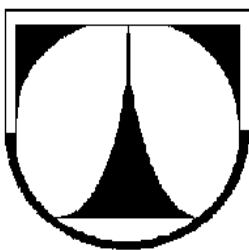


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2006

ZDENĚK BAŠTA

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU



**Optimalizace výroby svařovaných polotovarů pro kotle
ústředního topení**

**The optimalization of the production of welded semifinished
goods for central heating furnaces**

KMT- B-112

Autor diplomové práce:

Zdeněk Bašta

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Kubíček

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Dvořáček

Rozsah práce:

Počet stran: 109

Počet obrázků: 124

Počet tabulek: 1

Počet pramenů: 6



ANOTACE

FAKULTA: Strojní
Katedra materiálu

STUDIJNÍ PROGRAM: B2341 Strojírenství

OBOR: 3911 R 018 Materiály a technologie

ZAMĚŘENÍ: Materiálové inženýrství

JMÉNO: Zdeněk Bašta

TÉMA PRÁCE: Optimalizace výroby svařovaných polotovarů pro kotle
ústředního topení

VEDOUCÍ BP: Ing. Václav Kubíček

KONZULTANT: Ing. Jiří Dvořáček – O.K. STAVEBNÍ s.r.o.

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku svářecích technologií, používaných ve firmě O.K.STAVEBNÍ s.r.o. Červený Kostelec. Byly provedeny zkoušky metalografie svaru, přechodové oblasti a základního materiálu, gradient tvrdosti v oblasti svaru a jeho okolí a doplňující nedestruktivní zkoušky, a to zkouška ultrazvukem a kapilární zkoušky. Podle výsledků zkoušek byl vyhodnocen současný stav a navrhnutá optimalizace použitých materiálů a svařovacích technologií.

Klíčová slova: struktura svaru, svařování elektrickým obloukem, řezání laserem,
kotel Terminátor 2



ANOTATION

FAKULTA: Mechanical
Department of material science

STUDIJNÍ PROGRAM: B2341 Engineering

OBOR: 3911 R 018 Material and technology

ZAMĚŘENÍ: Material engineering

JMÉNO: Zdeněk Bašta

TÉMA PRÁCE: The optimalization of the production of welded semifinished goods for central heating furnaces

VEDOUCÍ BP: Ing. Václav Kubíček

KONZULTANT: Ing. Jiří Dvořáček – O.K. STAVEBNÍ s.r.o.

This bachelor's work focuses on the welding technology problems used in the firm O.K. STAVEBNÍ s.r.o. Červený Kostelec. Tests were undertaken of the weld metallography, transition region and basic material, hardness gradient in the weld section and its surroundings, and supplementary non-destructive testing that being an ultrasound and capillary test. The present state was analysed and the optimalization of the used material and welding technologies was proposed based on the test results.

Klíčová slova: structure of weld, welding of electric arc, laser cutting,
The furnace Terminator 2

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 4.ledna 2007

Podpis

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Svařování elektrickým obloukem.....	9
2.2	Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou.....	14
2.3	Svařování impulsním obloukem (Puls – MIG).....	16
2.4	Svařování elektrickým obloukem plněnou elektrodou	17
2.5	Struktura svaru.....	19
2.6	Svařitelnost austenitických chrómoniklových ocelí	37
2.7	Plazmové řezání kovů.....	39
2.8	Řezání laserem.....	42
2.9	Řezání svazkem urychlených elektronů.....	44
2.10	Základy nedestruktivních kontrolních metod používaných v oblasti výroby svařovaných konstrukcí.....	44
2.11	Kontrola svarů prohlídkou.....	45
2.12	Zkoušení svarů prozařováním.....	45
2.13	Zkoušení svarů ultrazvukem.....	49
2.14	Zkoušení magnetickou práškovou metodou.....	55
2.15	Zkoušení metodou kapilární.....	57
3	Experimentální část.....	59
3.1	Kotel Terminátor 2.....	59
3.2	Plazmové řezání kovů.....	62
3.3	Metalografie svaru, přechodové oblasti, základního materiálu a gradient tvrdosti.....	62
3.4	Nedestruktivní zkouška metodou kapilární.....	101
3.5	Zkoušení svarů ultrazvukem.....	103
4	Diskuse výsledků.....	105
5	Závěr.....	106
	Seznam použité literatury.....	107

1 Úvod

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval optimalizací výroby svařovaných polotovarů pro kotle ústředního topení, protože v dnešní době spalování biomasy nabývá stále většího významu v souvislosti s ochranou životního prostředí. Ochrana životního prostředí se pro nás stává zásadní otázkou v budoucnosti celého lidstva. Spalování biomasy se jeví jako jedna z mála možností v zachování životního prostředí, které by bylo optimální v budoucnosti.

Měl jsem možnost seznámit se ve své praxi s prací firmy O.K. Stavební Červený Kostelec, která vyrábí a dodává několik druhů kotlů na spalování biomasy pro firmu Solarfocus, se sídlem v Rakousku. Tato firma se nezabývá pouze spalováním biomasy, ale i výrobou solárních kolektorů a dalších speciálních technologií, které chrání životní prostředí.

Při zpracování dřeva vzniká odpad, který se dále upravuje na pelety. Ty se potom mohou zavážet do zásobníků, které jsou instalovány v domácnostech. Pelety jsou dále automaticky přiváděny ze zásobníku přímo do kotle pomocí šnekového dopravního systému, které je řízeno elektronicky. Při spalování se do ovzduší uvolňuje CO_2 a ten se přirozeným koloběhem v přírodě vrací opět do půdy, kde působí jako hnojivo, a tím je dále podporován růst biomasy.

2 Teoretická část

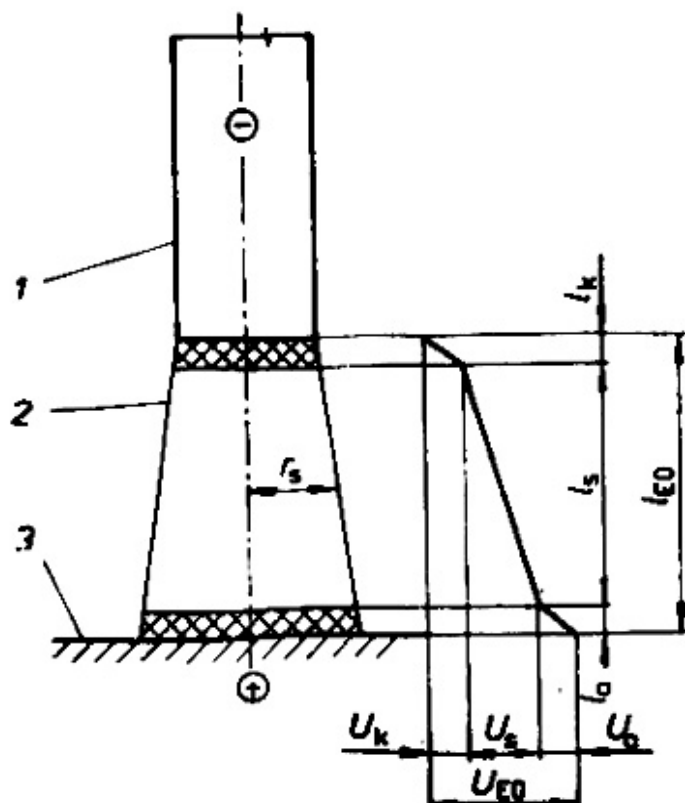
2.1 Svařování elektrickým obloukem

Elektrický oblouk je výboj v plynech. Při svařování vzniká obvykle mezi elektrodou a základním materiálem. Jeho výkon, geometrický tvar a teplotu je možno podle technologických požadavků v širokých mezích měnit. Tato velká variabilita dala vzniknout řadě způsobů svařování:

- ruční svařování obalenými elektrodami,
- svařování pod tavidlem,
- svařování v ochranných atmosférách.

Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku velmi rychle, za vysokých teplot a jsou ovlivňovány:

- geometrickým uspořádáním systému katoda – anoda,
- chemickým složením plazmatu, okolní atmosféry, elektrod,
- tepelnou vodivostí plazmatu, elektrod a základního materiálu. [1]



Obr.1: Hlavní část elektrického oblouku:

- 1 – elektroda, 2 – sloupec oblouku, 3 – základní materiál, U_k – katodový úbytek napětí, U_s – úbytek napětí ve sloupci oblouku, U_a – anodový úbytek napětí, U_{EO} – napětí na oblouku, l_a – délka anodové oblasti, l_s – délka přechodové části oblouku, l_k – délka katodové oblasti, l_{EO} – celková délka oblouku, r_s – poloměr sloupce elektrického oblouku [1]

Základní části elektrického oblouku

Sloupec elektrického oblouku:

Má tvar mírně se rozšiřujícího kužele směrem od katody k anodě. Elektrická vodivost sloupce je způsobena přítomností elektronů a anionů, které vznikají v důsledku termické ionizace. Plazma elektrických svařovaných oblouků je obvykle ve stavu „kvazineutrálním“, tj. v daném objemu a v okamžiku předpokládáme stejný počet kladných a záporných částic. Disociační a ionizační energie složek plazmatu se v okrajových částech oblouku ovlivňuje a technologicky využívá ke svařování.

Maximální teploty jsou ve středu sloupce oblouku a odtud klesají k okraji. Při ručním svařování jsou teploty oblouku v rozmezích 4 200 až 5 700°C, při svařování pod tavidlem 6 200 až 7 600°C. U svařování MIG a MAG vysoká proudová hustota vytváří podmínky pro vznik slabě ionizovaného plazmatu. Teplota v oblouku

v oblasti plazmatu při svařování MIG dosahuje 12 000 až 15 000°C, při MAG (CO₂) kolem 10 000°C.

Katodová oblast:

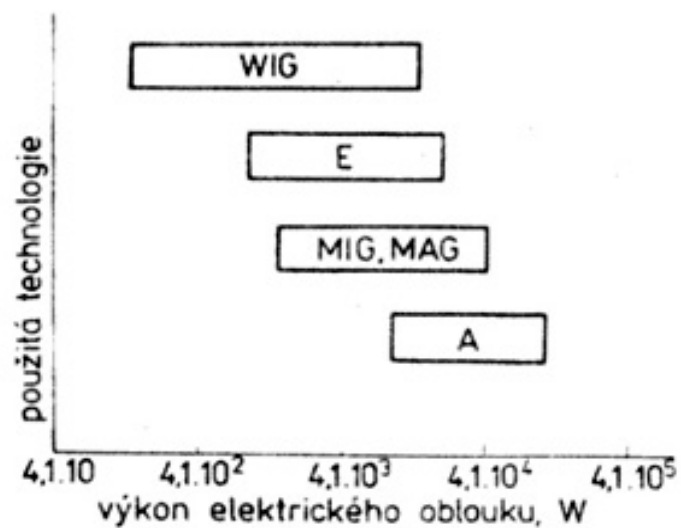
V oblasti katody dochází k emisi elektronů, která se soustřeďuje do katodové skvrny. Elektrický oblouk se zužuje, hustota proudu v katodové skvrně je 10^4 až 10^5 A•cm⁻². Katodový úbytek $U_k=10$ až 16 V, teplota klesá z teploty t_s na teplotu povrchu katody, kolem 2 230°C.

Anodová oblast:

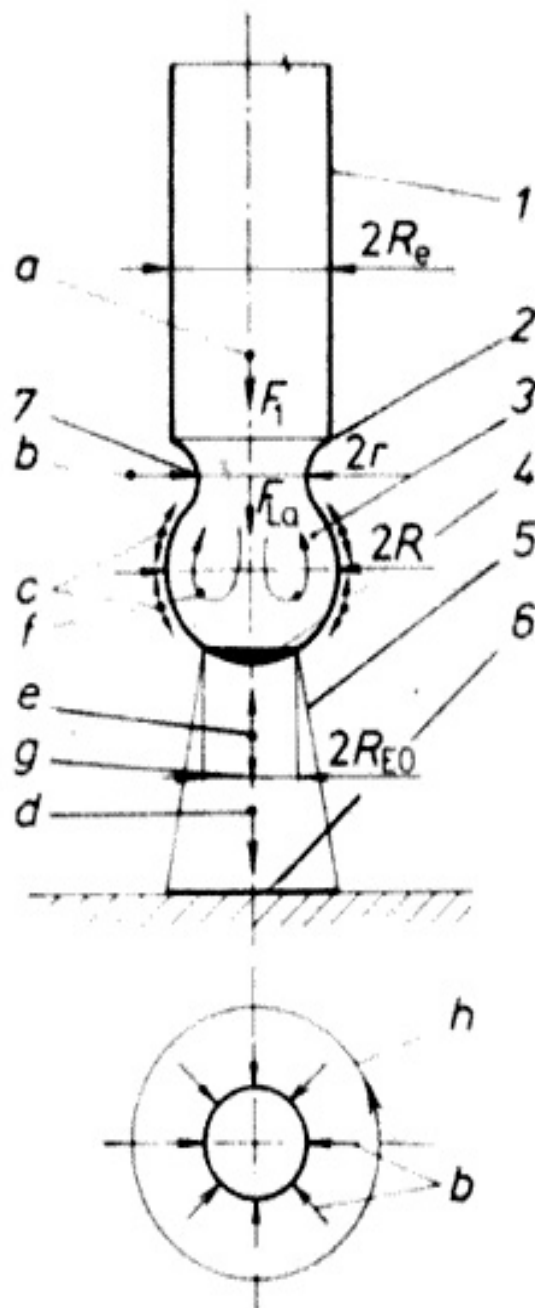
Anodová oblast produkuje větší tepelný výkon než oblast katodová v důsledku neutralizace katodou emitovaných elektronů. Anodová skvrna má větší plochu. Anodový úbytek $U_a=4$ až 8 V. U anod s malým odvodem tepla (obalené elektrody) je teplota o 500 až 600°C vyšší než na katodě. [1]

Přenos materiálu elektrickým obloukem

Při přenosu nataveného materiálu elektrody do svarové lázně se uplatňuje složitý systém silového působení. Velikost, směr a výslednice sil jsou určovány svařovacími parametry (proudová hustota, průměr elektrody, polarita, apod.). Gravitace působí podle polohy svařování, povrchové napětí udržuje kapku kovu na konci elektrody, jeho snížení zlepšuje přenos. Při přenosu se výrazně uplatňuje působení elektromagnetických sil. Elektrický oblouk protékající soustavou elektroda – oblouk – základní materiál vytváří magnetické pole, jehož silové účinky (Lorenzovy síly) působí v radiálním a axiálním směru. Radiální tlak vyvolává zmenšení průřezu kapičky, které se samovolně urychluje a vede v konečné fázi k oddělení kapičky kovu od elektrody, tzv. pinch-efekt. V axiálním směru kapku dále urychluje směrem do svarové lázně axiální Lorenzova síla. Impulsní přenos zlepšuje ovládání a formování svarové lázně, snižuje spotřebu energie a zvyšuje svařovací rychlost. [1]



Obr.2: Výkon oblouků při různých technologiích svařování
 E – ruční svařování elektrickým obloukem, WIG, MIG, MAG – svařování
 v ochranných atmosférách, A – automatické svařování pod tavidlem [1]



Obr.3: Síly při přenosu kovu elektrickým obloukem

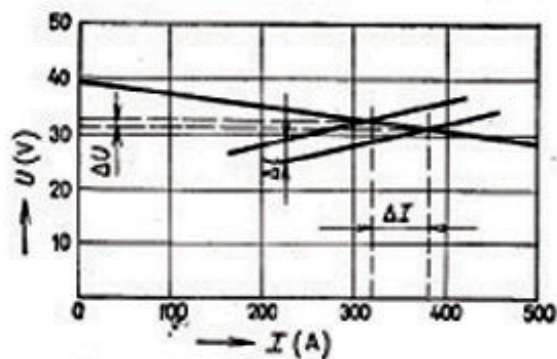
1 – elektroda, 2 – hranice natavené oblasti, 3 – kapička taveniny, 4 – katodová skvrna, 5 – sloupec oblouku, 6 – anodová skvrna, 7 – zmenšení průřezu, a – působení gravitace (F_1), b – směr radiálního působení magnetického pole (pinch efekt), c – povrchová napětí, d – směr elektrostatických sil, e – síly odpařujícího se kovu, f – viskozita taveniny, g – dynamický účinek proudícího plazmatu, h – směr magnetického pole [1]

2.2 Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou

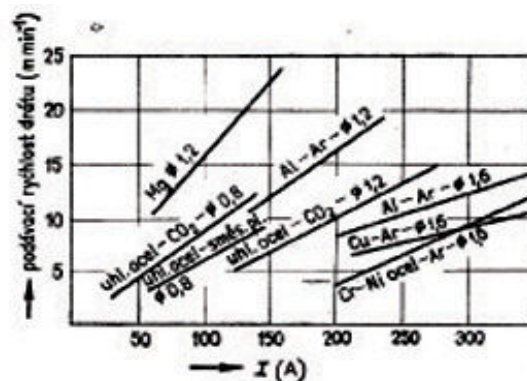
Při tomto způsobu svařování hoří oblouk mezi holým drátem, který je automaticky podáván ze zásobníku do svaru a svařovaným základním materiálem v ochranné atmosféře různých plynů. Pro tuto technologii svařování je charakteristická vysoká proudová hustota (100 až 400 A mm^{-2} svařovacího drátu) proti ručnímu svařování (10 až 20 A mm^{-2}). Vysoká proudová hustota je příčinou značné rychlosti odtavování přídavného drátu, velké svařovací rychlosti, vysokého výkonu odtavení a hlubokého závaru. Teplota v oblouku v oblasti plazmy při svařování WIG $6\,200$ až $7\,600^\circ\text{C}$, při svařování MIG dosahuje $12\,000$ až $15\,000^\circ\text{C}$, při svařování MAG (v CO_2) kolem $10\,000^\circ\text{C}$. Na vyšší teploty oblouku mají v tomto případě vliv disociační a slučovací (rekombinační) poměry, tj. $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}_2$, kde zpětné sloučení na CO_2 u povrchu svařovaného materiálu uvolní tepelnou energii, a tím podpoří výši průvaru. Využití teploty oblouku u tohoto způsobu je proti způsobu WIG (30 až 50%) vysoké (85 až 90%).

Při svařování způsobem MIG, MAG má se zřetelem k efektivnosti svařování a vzhledu svarové housenky velký význam způsob přechodu kapek kovu z přídavného drátu přes elektrický oblouk do svaru.

Při svařování se používá buď jednoho plynu (Ar, CO_2), nebo směs více plynů (směsné plyny). Plyny se dodávají v lahvích, popřípadě v cisternách, odkud se přečerpá zkapalněný plyn do zásobníku, přes odparku se získává plynný stav a odvádí se do centrálního rozvodu. Tyto plyny jsou velmi čisté, nejsou vlhké a jsou ekonomicky velmi výhodné. [2]

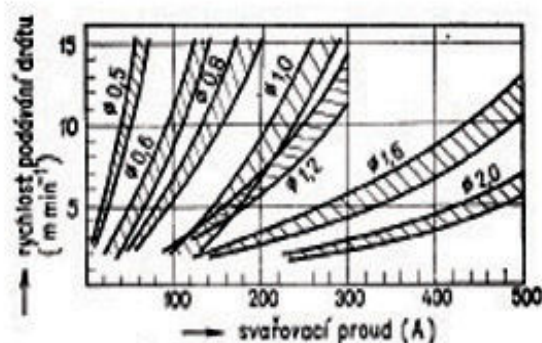


Obr.4: Statická charakteristika zdroje proudu pro svařování v ochranné atmosféře CO_2 [2]



Obr.5: Závislost svařovacího proudu a rychlosti podávání přídatného drátu při svařování v CO_2 [2]

Pro svařování způsobem MAG je nutno použít zdroje svařovacího proudu s tvrdými statickými charakteristikami, mírně klesajícími. U zdrojů s tímto průběhem statických charakteristik nastávají velké změny intenzity svařovacího proudu již při velmi malé změně napětí na oblouku, zaviněné změnou jeho délky (vlivem svářeče, nerovnosti svařované konstrukce apod.). Při svařování v ochranných atmosférách tavící se elektrodou (MIG, MAG), protože se používá přídatných drátů malých průměrů, se dosahuje vysoké proudové hustoty, jejímž vlivem se statická charakteristika oblouku mění z klesající na stoupající. Těchto uvedených jevů se používá k samoregulaci délky oblouku, aby délka oblouku byla co nejvíce konstantní. Svařovací proud se reguluje změnou rychlosti posuvu přídatného drátu, u moderních poloautomatů většinou plynule. Ke správným odtavovacím poměrům se dojde tehdy, je-li dodržena správná závislost mezi intenzitou svařovacího proudu a rychlostí podávání drátu. [2]

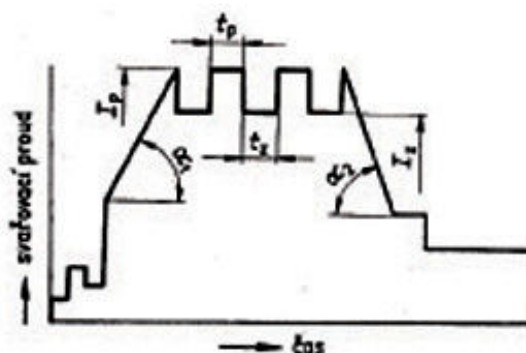


Obr.6: Svařovací parametry pro svařování v ochranné atmosféře CO_2 [2]

2.3 Svařování impulsním obloukem (Puls – MIG)

Při svařování v ochranných atmosférách vysokými proudy (vysoká proudová hustota) se dosahuje při dlouhém oblouku tzv. *sprchového přenosu roztaveného kovu z přídavného materiálu*. Ovšem příliš vysoký svařovací proud může mít za následek zvýšení rozstřiku, vruby na přechodu svaru do základního materiálu, horší jakost povrchu svaru, pórovitost a propálení (protečení) kořene svaru. I tenzotermický účinek svařování na základní materiál je vyšší. Proto se tato metoda používá pro svařování materiálu větších tloušťek ve vodorovné poloze a nehodí se příliš pro svařování v jiných polohách. Ovšem produktivita je vysoká.

Naopak při nízkých svařovacích proudech dochází k přechodu kovu ve velkých kapkách při nízkém počtu kapek za časovou jednotku. I zde nejsou vytvořeny příznivé podmínky pro kvalitní spoje v různých polohách a ve vodorovné poloze je zase nekvalitní, nepravidelný povrch svarových housenek. Rozstřik je značný, protože kinetická energie letících kapek je malá a kapky jsou špatně usměřňovány k povrchu vznikajícího svaru. [2]



Obr.7: Průběh proudu při impulsním svařování
 I_z – hodnota svařovacího proudu základního
 I_p – hodnota svařovacího proudu impulsního [2]

Aby bylo dosaženo optimálních podmínek sprchového přenosu kapek kovu při nízkých proudech, využívá se tzv. impulsního způsobu svařování. Při této technologii se používá stejnosměrný proud, který se mění mezi dvěma hladinami. Sleduje se průběh svařovacího proudu v závislosti na čase, mezi tzv. základním proudem, který musí ještě ionizovat prostředí a impulsním proudem, při němž vzrostou síly pinch-

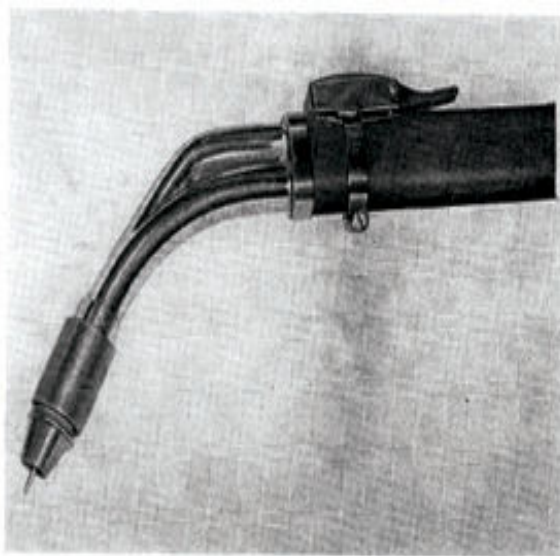
efektu, takže se vytvářejí malé kapičky roztaveného kovu, které se dobře usměřují (vymrštění) do tavné lázně.

V současné době umožňují zařízení vyráběná pro tuto technologii svařování nastavovat a měnit nejen hodnoty základního a impulsního svařovacího proudu, ale i dobu trvání a přerušení impulsní složky i celkový průběh nabíhání a ukončení svařovacího procesu. Tak se dosáhne menšího tenzotermického ovlivnění základního materiálu, a tím snížení pnutí a deformací, je možno ovlivňovat množství přivedeného tepla, svařovat materiály citlivé na teplo. Tímto způsobem lze svařovat v různých polohách tenké materiály, podstatně se zlepšuje kresba housenky; je vhodný při svařování neželezných kovů, zejména hliníku a vysoce legovaných ocelí. Metoda je využívána i při ručním svařování, hlavně pro kořenové partie svarových spojů a na montážích pro svařování v různých polohách. Zvyšuje se tím i produktivita práce, jakost a vzhled povrchu housenky. Používají se frekvence 25; 33,3; 50; 100Hz. Poměr impulsního proudu I_i k základnímu proudu I_z je obvykle 3:1 při 50Hz. Jako ochranné atmosféry se používají směsné plyny, např. 90% Ar + 10% CO₂. Svařování impulsním obloukem se používá i u způsobu WIG. [2]

2.4 Svařování elektrickým obloukem plněnou elektrodou

Při tomto svařování se používá jako přídavného materiálu svařovací trubičky. Svařování podle typu svařovací trubičky se uskutečňuje v ochranné atmosféře (CO₂, směsné plyny: Ar+ CO₂;Ar+O₂;Ar+ CO₂+O₂), nebo bez ní (způsob MOG). Svařovací trubičky bez plynové ochrany zjednodušují vybavení pracoviště, protože není třeba lahví s ochrannými plyny a centrálních rozvodů. Obsah trubičky tvoří bazické kyselé nebo rutilové struskotvorné přísady, jež při odtavování vytvářejí na povrchu svarových housenek tenkou vrstvu strusky, která svými metalurgickými vlastnostmi pozitivně ovlivňuje formování a vzhled jejich povrchu. Náplň obsahuje rovněž legující a dezoxidační prvky a sloučeniny, které jako obal u elektrod metalurgicky ovlivňují čistotu, chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti svarového kovu. Ionizační látky zaručují snadnější zapalování a stabilitu hoření oblouku. U svařovacích trubiček bez plynové ochrany obsahuje jejich náplň plynotvorné látky, silně afinní ke kyslíku a dusíku, které při hoření samy vytvářejí

ochrannou atmosféru a chrání tavnou lázeň před škodlivými účinky vzduchu. Trubičkami lze svařovat v poloze vodorovné shora, vodorovné a šikmé na svislé ploše. [2]



Obr.8: Svařovací hubice s odsáváním zplodin při svařování [2]

Svařovací trubičky jsou výrobcem dodávány ve svitcích o minimálním vnitřním průměru 210 mm (nedoporučuje se převíjet, neboť se trubičky rozevírají a znehodnocují).

Pro zajištění hygienických podmínek, zvláště při použití trubiček bez plynové ochrany, je nutné řádné odsávání. Proto jsou zařízení pro tuto technologii vybavena speciálními svařovacími hubicemi, které kromě své normální funkce (jako při klasickém poloautomatickém svařování v CO_2) zajišťují i odsávání zplodin hoření bezprostředně v oblasti sváru.

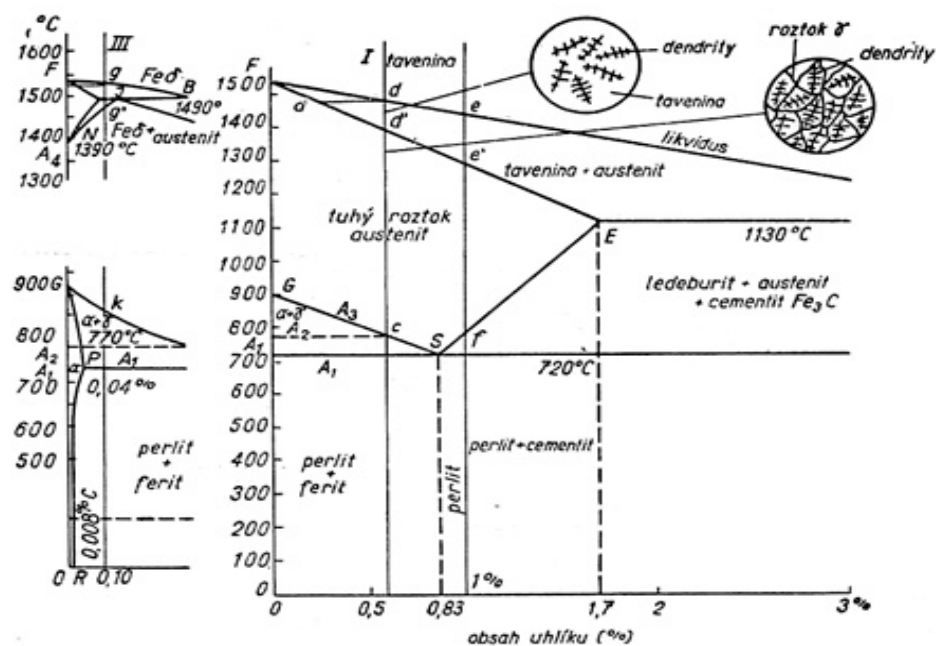
V současné době se tato problematika řeší použitím svařovací kukly s přívodem čerstvého vzduchu. Toto řešení vede ke snížení hmotnosti svařovací hubice, a tím k její lepší ovladatelnosti. [2]

2.5 Struktura svaru

Budeme sledovat strukturní přeměny rozličných druhů ocelí v různých oblastech svarového spoje: změnu velikosti zrn, vlastnosti nových struktur, které vznikají při fyzikálně chemických přeměnách. Popíšeme krystalizaci tuhnoucího kovu (svarový kov) a přeměny ve stavu tuhém (základní kov). [3]

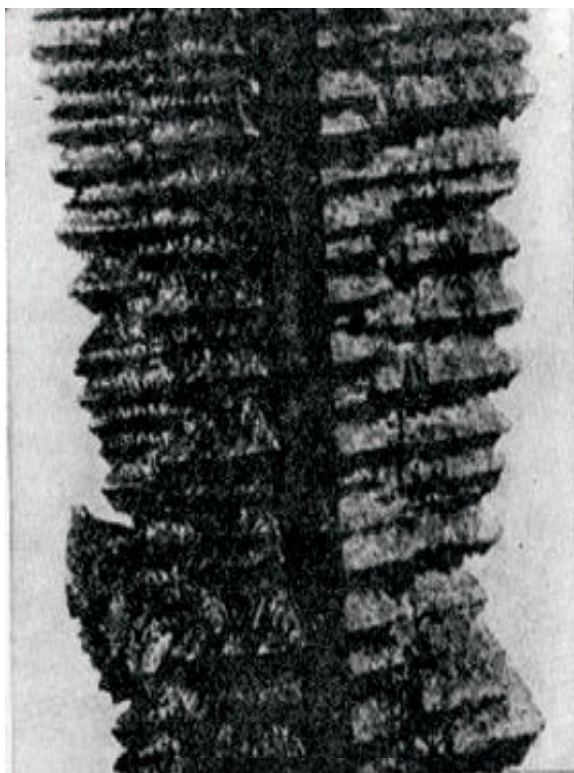
Struktura svarového kovu

V diagramu Fe-C (*obr.9*) uvažujme dvě oceli, jednu podeutektoidní ($C = 0,60\%$, označenou **I**) a druhou nadeutektoidní ($C = 1\%$), obě v tekutém stavu ($t > 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) a předpokládejme, že zvolna chladnou. Při přechodu čáry likvidu se v bodech *d* a *e* objeví první krystalizační zárodky u oceli **I** obsahující $0,25\%$ C (bod *a*) a u oceli nadeutektoidní $0,40\%$ C. Tyto zárodky vznikají podle Tammanova zákona, tj. jednak v závislosti na krystalizační schopnosti, která závisí na množství zárodků, vznikajících při určité teplotě a jednak na krystalizační rychlosti, která je závislá na rychlosti ochlazování. V oblasti taveniny + tuhého roztoku γ , tedy mezi body *dd* a *s ee*, současně s přibýváním krystalů austenitu roste koncentrace uhlíku. V bodech *d* a *e* na solidu je obsah uhlíku v tuhém roztoku $0,60\%$ u oceli **I** a 1% v případě oceli nadeutektoidní. [3]



Obr.9: Rovnovážný digram pro uhlíkové oceli [3]

V oblasti mezi likvidem a solidem vznikají primární krystaly austenitu s charakteristickou dendritickou stavbou (*obr.10*). [3]

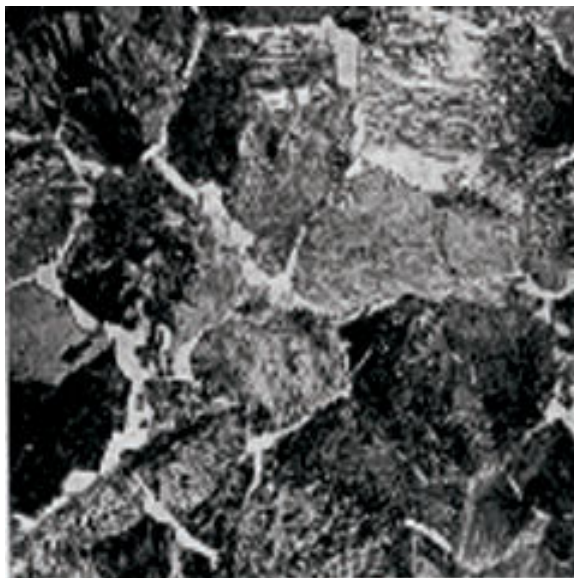


Obr.10: Černovův krystal

Dendrit vzniklý ve staženině ocelového ingotu o váze 100 tun (délka dedritu 36cm) [3]

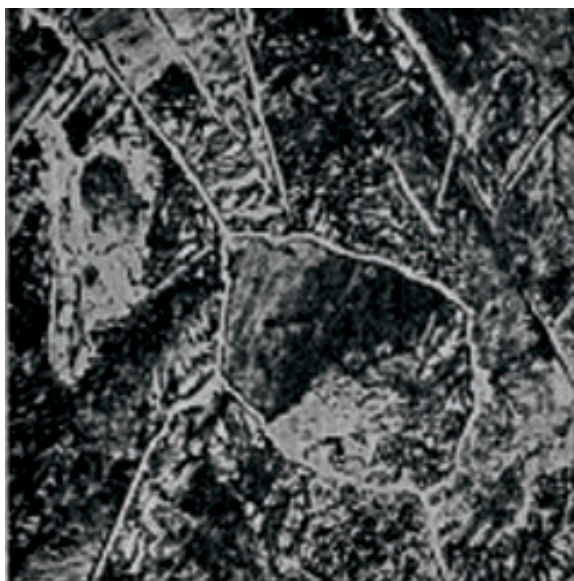
Předpokládáme-li souhlasně s Belajevem, že v horní části oblasti austenitu dochází ke vzniku zrn, tedy ke granulaci primárně vykrystalizovaných dendritů, je jasné, že během ochlazování vzniká velký počet zrn γ nebo zrn austenitu na místě každého dendritu.

Při teplotě rozpadu austenitu objeví se jako první fáze v oceli **I** ferit nebo železo α , a to v bodě *c*, což je zárodek feritických zrn. Po dosažení eutektoidní teploty se z austenitu vylučuje perlit. Při nižší teplotě pozorujeme u podeutektoidní oceli ochlazované velmi pomalu ve struktuře dvě strukturní součásti: ferit α ve tvaru zrn nebo síťoví a perlit ($\text{Fe } \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) (*obr. 11*). [3]



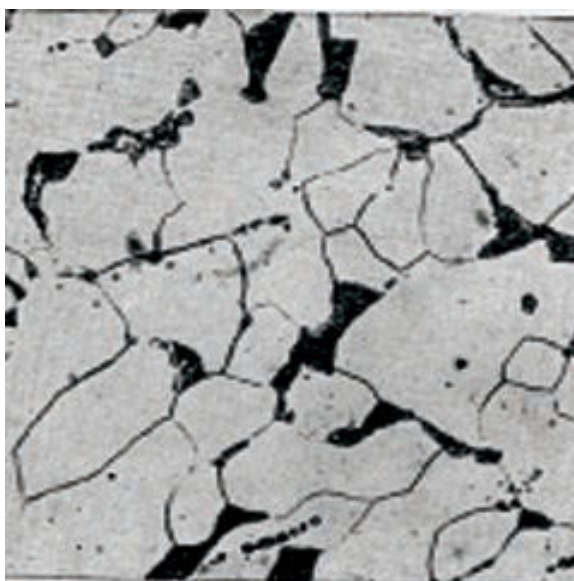
Obr.11: Struktura oceli s 0,6% C:
feritové síťoví a perlit; 200x, leptáno nitalem [3]

U oceli nadeutektoidní jako první fáze, která se vylučuje v bodě *f*, je cementit, a to až do eutektoidní teploty, při níž vzniká perlit, stejně jako v předešlém případě. po ochlazení zpozorujeme pod mikroskopem po vhodném naleptání zrna perlitu obklopená síťovím cementitu (*obr.12*). [3]



Obr.12: Struktura oceli s 1% C:
perlit a sít'ový cementit; 500x, leptáno nitalem [3]

V oceli takto chladnoucí zrna feritu porostou. Jde o strukturu hrubozrnnou a v případě, že je ferit orientován podle krystalografických rovin, jde o tzv. strukturu Widmanstättenovu. Ohřejeme-li nyní tuto licí strukturu až do oblasti austenitu, vznikne při přechodu přes čáru teplot A_{c3} velké množství malých zrn austenitu a při opětném ochlazení na normální teplotu po překrystalizaci $\gamma \rightarrow \alpha$ se setkáme s jemnými zrny feritu a perlitu (*obr.13*). [3]



Obr.13: Struktura vyžíhané měkké oceli s 0,12% C:
rovnoměrné rozdělení obou složek: feritu a perlitu; 200x [3]

Je zřejmé, že existuje určitý vztah mezi velikostí austenitických a feritických zrn: z hrubého zrna γ vznikne hrubé zrno α a naopak. Přestože existuje tento vztah, není zrno α přesným obrazem zrna γ . Naproti tomu u ocelí nadeutektoidních cementitové síťoví dobře vyznačuje zrna austenitu. Ke stanovení velikosti zrn austenitu se využívá cementitového síťoví, a proto se k tomu účelu vzorky oceli nauhličují v oblasti austenitu (McQuaid – Ehnova zkouška).

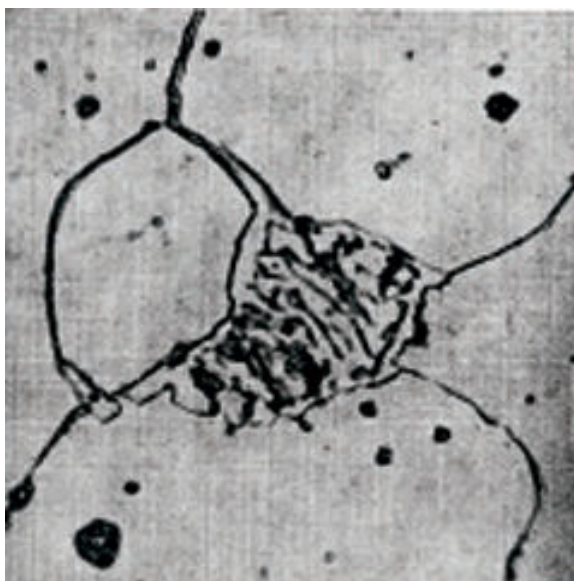
Nyní se zaměříme na tuhnutí oceli **III**, jejíž obsah uhlíku je přibližně 0,10%, což bývá častým případem ocelí tavně svařitelných (plamenem nebo obloukem *obr.9*)

Při přechodu likvidu v g vylučují se zárodky železa δ s velmi malým obsahem uhlíku ($C < 0,05\%$); zárodky se obohacují uhlíkem až na 0,07% při teplotě 1490°C. Peritektická přeměna, která nastává při této teplotě, je reakcí mezi taveninou B s obsahem 0,55% uhlíku a zárodky δ , přičemž vznikají krystaly austenitu. Mezi 1490°C a bodem $g\delta$ (1490°C) jsou dvě fáze $\delta + \gamma$, které se mění v zrna γ nebo v zrna austenitu při přechodu čáry NJ . [3]

Následující přeměny při dalším ochlazování probíhají shodně jako u oceli podeutektoidní, tj. začátek vylučování feritu v bodě K čáry GS při teplotě kolem 870°C a další růst feritických zrn.

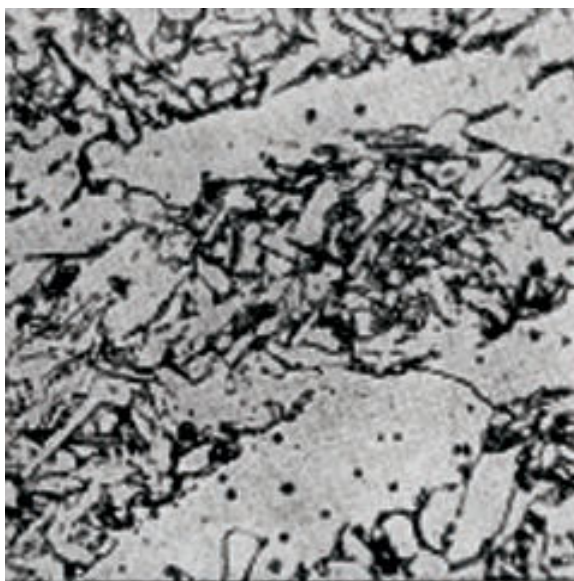
Obsahuje-li ocel méně než 0,05% uhlíku, vzniká z taveniny přímo fáze δ a přeměna $\delta \rightarrow \gamma$ probíhá podle čáry NJ .

V tuhém stavu při přechodu čáry PR nastane precipitace cementitu z feritu. Tento cementit nazýváme terciálním cementářem (*obr.14*); s touto strukturní součástí se setkáváme často jak u tavných svárů nezpracovaných, tak i u svarů tepelně zpracovaných. [3]

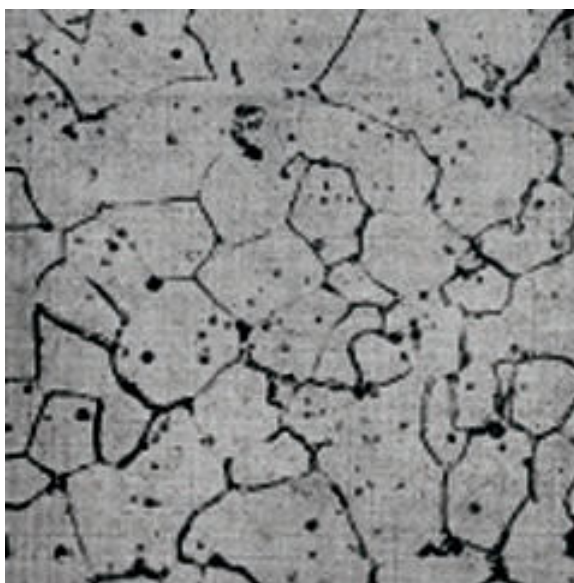


Obr.14: Terciální cementit na hranicích zrn feritu získaný žíháním svaru provedeného rutilovou elektrodou (0,07% C, 0,48% Mn, 0,38% Si); 1800x [3]

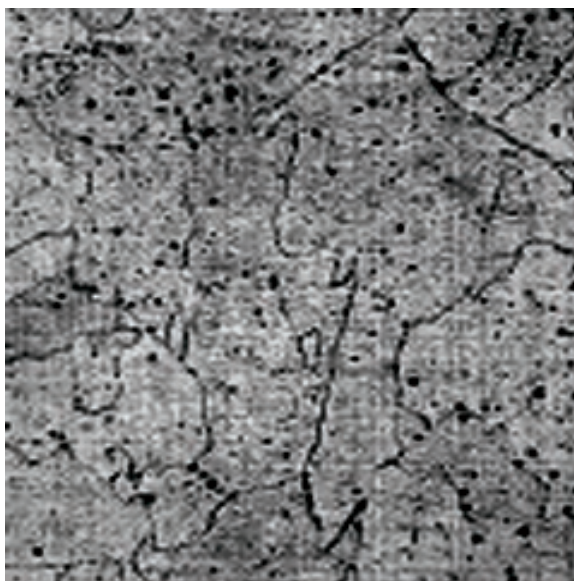
Struktura svarového kovu nataveného plamenem a obloukem má odlišný vzhled. Při svařování obloukem množství roztaveného kovu je velmi malé, rychlost ochlazování je velmi značná, může dosáhnout 1500 až 1600°C za minutu podle tloušťky svařovaných součástí. Primární struktura je hrubozrnná, orientovaná a dendritická; nazýváme ji strukturou kolumnární (*obr.17*). Tato struktura se nemění ohřevem pod bodem A_3 , avšak zjemňuje se žíháním při přechodu do austenitického stavu. Při obloukovém svařování při několikavrstvém první a střední vrstvy svarového kovu mají strukturu jemnou, pravidelnou s perlitem na hranicích zrn (*obr.16*) nebo s terciálním cementářem (*obr.17*); jen poslední vrstva má kolumnární strukturu (*obr.15*). [3]



Obr.15: Kolumnární struktura krycí vrstvy obloukového svaru (0,07% C, 0,75% Mn, 0,25% Si, 0,027% S, 0,018% P); 1000x [3]



Obr.16: Struktura ve středním svaru téhož svaru: kolumnární struktura normalizačně vyžíhaná následujícími vrstami svaru; 1000x [3]

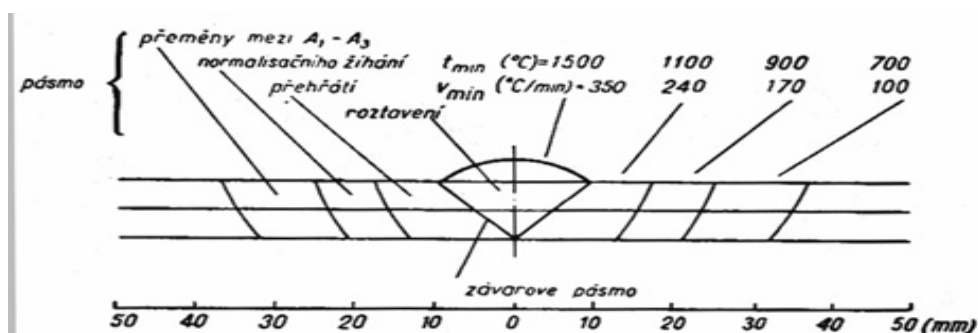


Obr.17: Struktura svarového kovu při svařování kyslíkoacetylenovým plamenem; 1000x [3]

Při svařování plamenem, při němž se svar zpravidla provádí jako jednovrstvý, je množství roztaveného kovu mnohem větší, rychlost ochlazení mnohem menší ($V_m = 350^\circ\text{C}/\text{min}$), výsledná struktura je hrubá, nepravidelná, s výraznou orientací (obr.17) v celém průřezu svaru. [3]

Přeměny v základním svaru

Tepelný cyklus svařování vytváří v každém bodě základního kovu stacionární tepelný stav určený nejvyšší dosaženou teplotou a rychlostí ochlazování V_m (obr.18).



Obr.18: Tepelná pásma vyvolaná svařováním kyslíkoacetylenovým plamenem na ocelovém plechu tloušťky 10mm. [3]

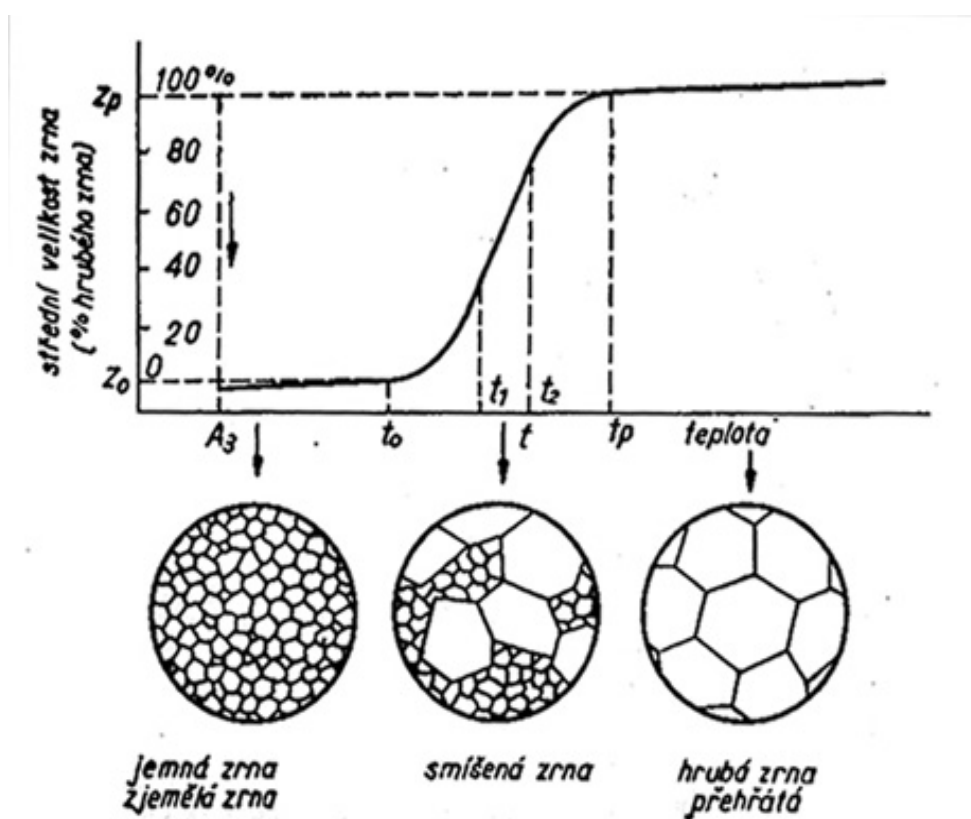
t_{\min} = minimální dosažená teplota
 V_{\min} = minimální rychlost ochlazování ($^\circ\text{C}/\text{min}$)

Přeměny v dané základní oceli závisí na těchto dvou činitelích: Z_m a V_m ; proto je nutno uvažovat tato pásma:

Pásmo přehřáté v těsné blízkosti ($t > 100^\circ\text{C}$), kde nastává značné zhrubnutí struktury.

Pásmo žíhané, kde je teplota mezi 900 a 1000°C , kde struktura zůstává jemnou.

Pásmo ohřáté na teploty mezi $A_1 - A_3$ (720 až 910°C), kde jsou teploty nižší než v pásmu žíhání. V tomto pásmu mohou nastat druhotné jevy: tvorba terciálního cementitu, precipitace nitridů železa Fe_4N atd. [3]

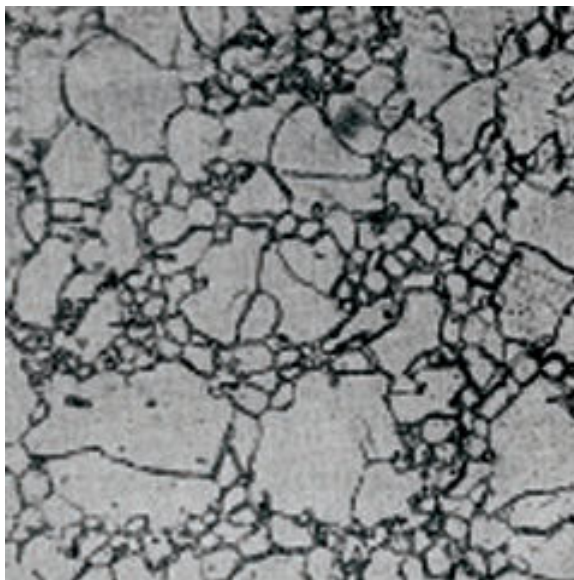


Obr.19: Vliv teploty na růst zrna [3]

Pásmo základního kovu tepelně neovlivněného, kde byly teploty nižší než A_1 (720°C).

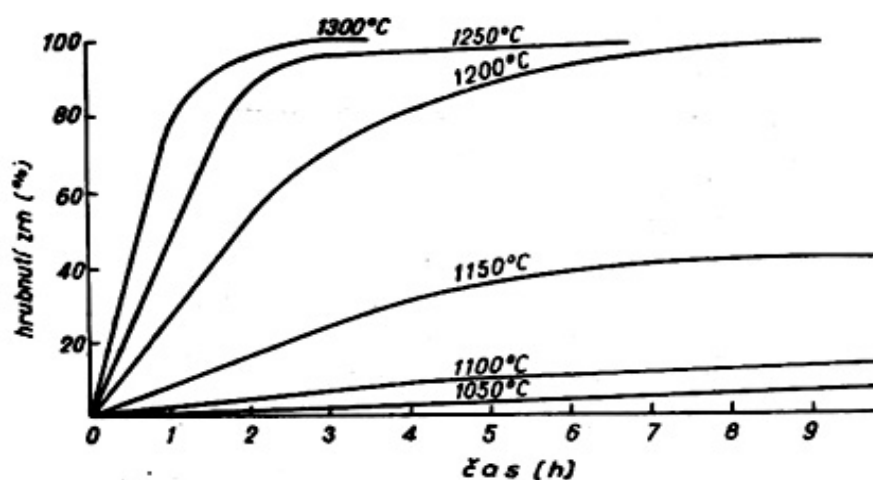
Když ohříváme zvolna ocel z normální teploty na teplotu vyšší než A_3 , nepozorujeme žádné zhrubnutí struktury až do určité teploty t_i (obr.19); pak začnou zrna hrubnout a tvoří se smíšená (heterogenní) struktura složená z hrubých a jemných zrn (obr.20). Od tohoto okamžiku se stoupající teplotou se úměrně zvětšuje počet hrubých zrn, která pohlcují jemná zrna. Teplota t_s , při které je ve struktuře

100% hrubých zrn, určuje teplotu přehřátí. Také při konstantní teplotě vyšší než t_i roste zrno v závislosti na čase; tento růst je tím rychlejší, čím více se blížíme teplotě přehřátí. [3]



Obr.20: Smíšená, hrubá a jemná zrna, na okraji pásma přehřátí ve svaru plamenem; 200x [3]

Kombinace těchto dvou činitelů je zobrazena v diagramu na *obr.21* pro velmi měkkou ocel. Z něho je zřejmé, že celkové přehřátí při 1200°C nastane teprve po osmi hodinách, kdežto při 1300°C již za dvě hodiny. Při teplotách nižších než 1200°C vznikají jen smíšené struktury bez ohledu na dobu ohřevu. [3]



Obr.21: Vliv teploty a času na vzrůst zrna [3]

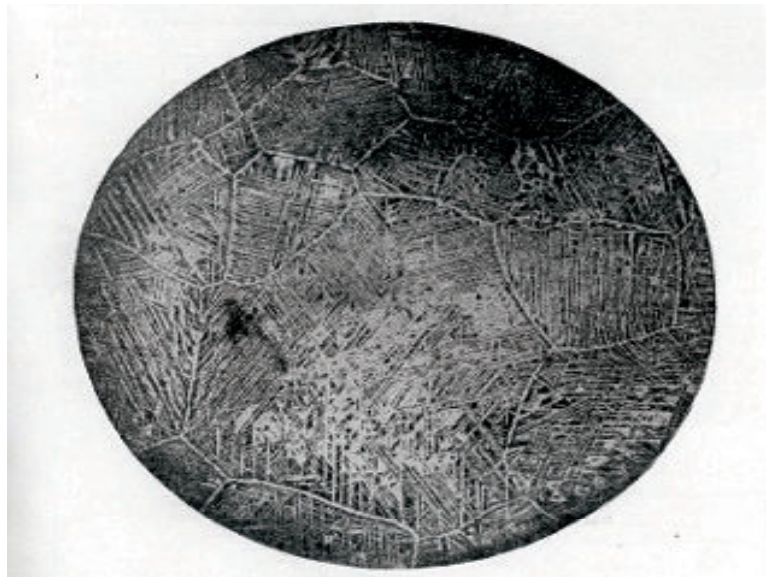
Widmanstättenova struktura

Tato zvláštní struktura, byla poprvé pozorována A. Widmanstättenem v meteoritickém železe (*obr.22*). Tato struktura je charakterizována symetrií podle tří nebo čtyř hlavních směrů a způsobuje křehkost ocelí.

Hanemann sestavil první diagram (*obr.23*) různých struktur, které vznikají v závislosti na třech spolupůsobících činitelích:

- chemické složení oceli,
- teplota přehřátí austenitu,
- rychlost ochlazování této fáze.

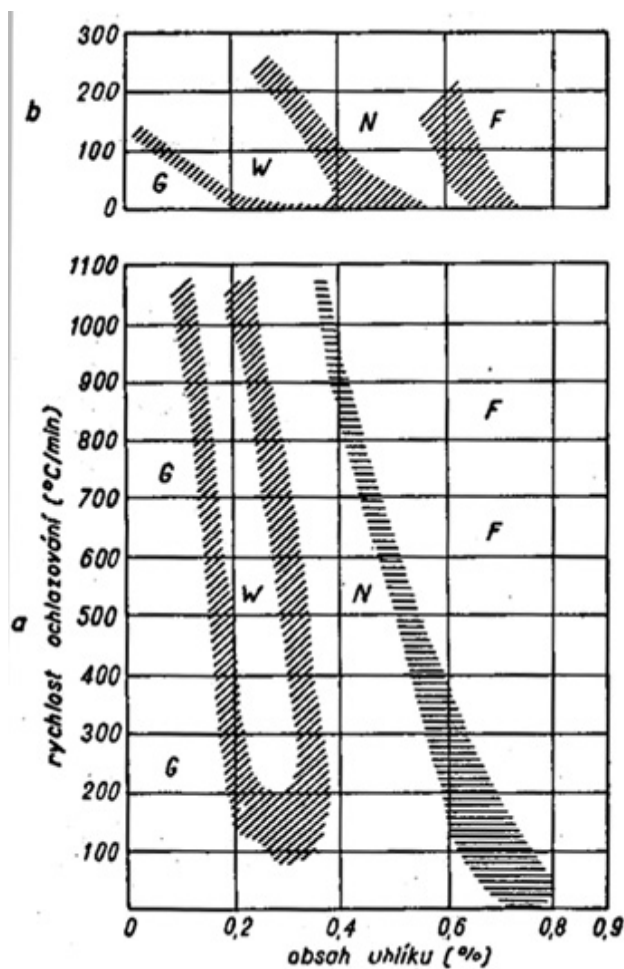
Je-li oblast vzniku Widmanstättenovy struktury poměrně úzká ($C = 0,2$ až $0,4\%$) při malém přehřátí (*obr.23a*), rozlišuje se tato oblast směrem k nižšímu obsahu uhlíku, když teplota přehřátí stoupá (*obr.23b*). Rovněž vliv třetího činitele, tj. rychlosti ochlazování je menší než účinek přehřátí, jenž tedy převládá. [3]



Obr.22: Struktura Widmanstättenova pozorovaná N.T.Belajevem meteoritickém železe. [3]

Složky precipitují podél krystalografických rovin oktaedru, a to přednostně ve dvou nebo třech směrech; 6x

Spolu s N. F. Belajevem studovali podmínky tvoření této struktury ve svarech, které se vylučuje vylučováním feritu v rovinách rovnoběžných s rovinami kluznými. Tvoření této struktury je závislé na třech hlavních činitelích, uvedených výše. [3]

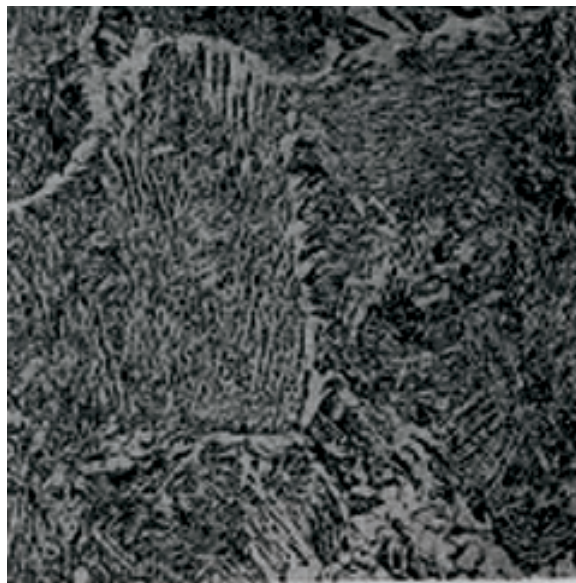


obr.23: Diagram podle Hannemanna stanovící podmínky vzniku Widmanstättenovy struktury pro ohřev teplotě A_3 (a) a na teploty přehřátí (b) [3]

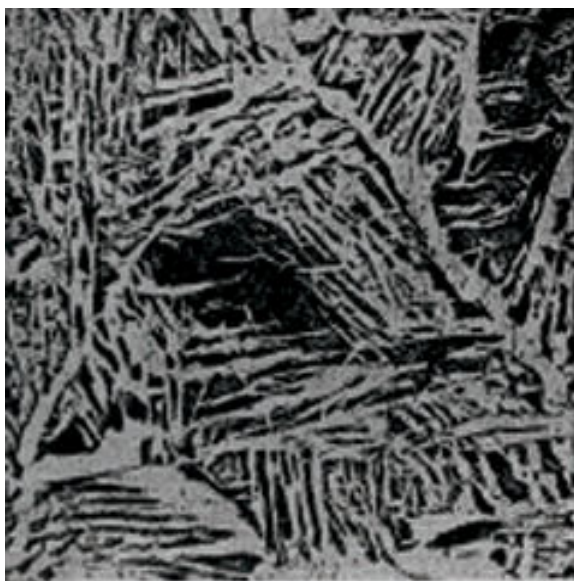
Je-li austenitické zrno poměrně jemné (nepřehřáté), může vzniknout při stejných podmínkách ochlazování struktura složená z pravidelných zrn, naopak je-li austenitické zrno hrubé, vzniká struktura s velkými krystaly a struktura Widmanstättenova.

Ve svarových spojích se může tvořit Widmanstättenova struktura buď ve svarovém kovu, nebo v přehřátém základním kovu a někdy také při řezání kyslíkem u rozměrných kusů. Vznik této struktury je závislý kromě chemického složení na tepelném cyklu vyvolaném svařováním, který je zase závislý na postupu a použité metodě svařování, na rozměrech a tvaru svařovaných součástí. Na základě znalostí o

rozložení tepla je možno předvídat, že svařování kyslíkoacetylenovým plamenem vytváří nejpriznivější podmínky pro vznik Widmanstättenovy struktury. Tato struktura může mít různý vzhled. Může být nedokonale vyvinutá (*obr.24,27*), není-li splněna jedna z uvedených podmínek; může být úplně vyvinutá (*obr.25*), tj. s přednostně usměrněnou orientací. Lamelární strukturní součást vyloučená rovnoběžně s kluznými rovinami může být buď perlit, nebo troosit. Některé chemické vlastnosti a zejména tvrdost závisí právě na druhu této součásti. [3]



Obr.24: Nedokonale vyvinutá Widmanstättenova struktura ve svaru plamenem; 100x [3]



Obr.25: Dokonale vyvinutá Widmanstättenova struktura ve svaru plamenem oceli s 0,15% C [3]

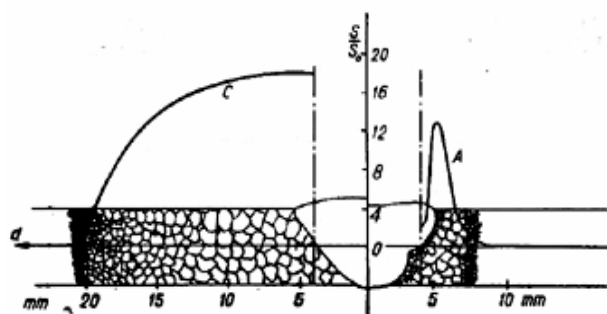
Některé prvky, jako mangan, chrom, molybden podporují tvoření Widmanstättenovy struktury.

Widmanstättenova struktura značně ovlivňuje mechanické vlastnosti svarového spoje a zvláště snižuje jeho houževnatost vlivem velikosti zrna. [3]

Změny ovlivňující stavbu zrn

Svařování obloukem

Při svařování obloukem se zpravidla nanáší jen velmi malé množství roztaveného kovu, takže tuhnutí je téměř okamžité. Důsledek toho je, že struktura roztaveného pásma je jemnější, usměrněná a jehlicovitá, je to tzv. *kolumnární struktura*; s tímto vzhledem struktury se obvykle setkáváme v posledních (krycích) vrstvách obloukového svaru. [3]



Obr.26: Vliv tepelného cyklu při svařování na velikost zrn základního kovu [3]

KŘIVKA C: svařování plamenem

KŘIVKA A: svařování elektrickým obloukem



Obr.27: Makrovýbrus svaru kyslíkoacetylenovým plamenem (tloušťka plechu 10mm) s různými pásmy schematicky znázorněnými na obr.26; 3x [3]

Jde-li o několikavrstvý svar, pak postupně nanášené horní vrstvy svým tepelným účinkem normalizačně vžihají spodní vrstvy, což vede ke zjemnění struktury a vzniku jemných polyedrických zrn; takto obvykle vypadá struktura ve střední části svarového kovu. [3]



Obr.28: Orientovaná struktura v pásmu závaru obloukového svaru feritické chromniklové kalitelné oceli elektrodou z nerezavějící oceli 25 Cr – 20 Ni. Na výbrusu jsou patrné dendrity v austenitickém svarovém kovu; 100x [3]

Krystalizace v *pásmu závaru* má stejně výraznou orientaci (*obr.27*), která je často porušena tepelným zpracováním způsobeným nepřetržitým navařováním dalších vrstev.

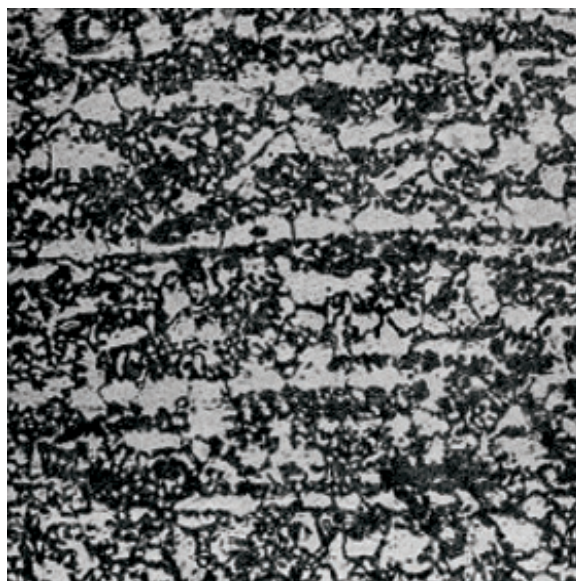
Přehřáté pásmo základního kovu je užší, hrubnutí zrn zde dosahuje maxima (křivka A, *obr.26*), v závarovém pásmu se potom struktura alespoň ve střední části svaru zjemňuje tepelným působením dalších vrstev svarového kovu.

Na makrosnímku (*obr.28*) obloukového svaru jsou tato jednotlivá pásma patrná. [3]

Změny fyzikálně chemické

Svařování obloukem

Teploty dosažené v různých pásmech přeměn jsou provázeny mnohem většími rychlostmi ochlazování, což vede k prudšímu kalení. [3]



obr.29: Struktura v pásmu přeměn mezi A_1 až A_3 (720 až 910 °C); 180x [3]

Prakticky tvoří tato různá pásma velmi malý objem, neboť jsou rozložena 4 až 5mm od okraje návarových ploch nezávisle na tloušťce plechů (*obr.30*). To je právě důsledkem

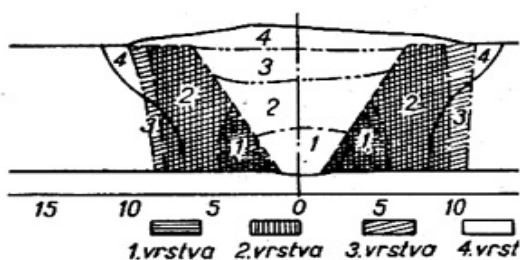


Obr.30: Makrovýbrus obloukového svaru V (tloušťka plechu 46mm)
Svařování v několika vrstvách působí částečně normalizační žíhání
pásem přeměn v základním kovu, charakterizované na
makrovýbrusu plochami s jemnou strukturou. [3]

obloukového svařování, které se dělá v malých vrstvách se sklonem
k normalizačnímu vyžíhání spodních vrstev svarového kovu (zjemnění zrna).

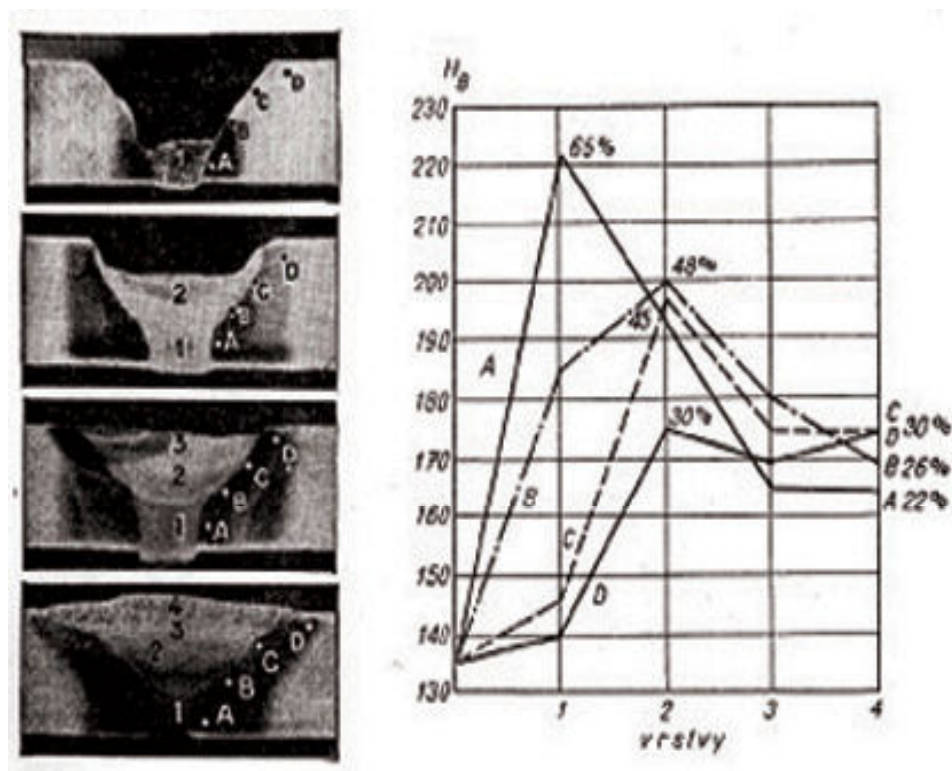
Postupné nanášení vrstev působí v určité míře také na strukturu pásem přeměny základního kovu, takže hlavně u tlustých plechů se setkáváme střídavě s pásmy ovlivněného a s pásmy částečně normalizačně vyžíhaného kovu (*obr.30*).

Tyto struktury jsou rozloženy ve velmi malém prostoru, jsou promíchány a velmi složité, neboť byly několikrát po sobě tepelně zpracovány (*obr.31*). Postupné nanášení vrstev mění stejně také strukturu pásma přehřátí, a proto i mechanické vlastnosti (*obr.32*). [3]



Obr.31: Účinek tepelného cyklu vyvolaného jednotlivými navařenými vrstvami svarového kovu na přeměny v základním materiálu [3]

Účinek popuštění se projevuje změnou v různých bodech tohoto pásma. Například v bodě A první vrstva způsobuje značné zvýšení tvrdosti až o 65% původní tvrdosti základního kovu; v tomto bodě tvrdost postupně klesá až se ustálí po nanesení třetí vrstvy na hodnotě o 25% vyšší než původní tvrdost. [3]



Obr.32: Vliv postupně navařovaných vrstev na změnu tvrdosti v pásmu přehřátí. Chemické složení základní oceli: 0,28% C, 0,54% Mn, 0,18% Si [3]

Stejně je tomu v bodech B, C, D v pásmu přehřátí. Nakonec dochází k vyrovnání mechanických vlastností a struktur, až snad na ojedinělá místa v horní části návarových ploch. [3]

2.6 Svařitelnost austenitických chrómoniklových ocelí

Svařitelnost austenitických ocelí chrómoniklových ovlivňují hlavní tři jevy:

1. *Citlivost k tvoření trhlin* ve svarovém nebo základním kovu, což souvisí se strukturou.
2. *Precipitace karbidu chrómu*, jejímž důsledkem je mezikrystalová koroze.
3. *Vznik intermetalické fáze δ* při určitém chemickém složení a v určité oblasti teplot, což je příčinou křehkosti oceli.

Chrómoniklová austenitické antikoroční oceli používané pro svařování mohou být rozděleny do několika skupin:

1. *Austenitické oceli typu 18-8* (18% Cr, 8% Ni) s přísadou nebo bez přísady jiných speciálních prvků, jako jsou molybden, titan, niob atd.

2. *Austenitické oceli typu 20-10* (20% Cr, 10% Ni) s přísadou nebo bez přísady jiných prvků.

3. *Austenitické oceli 16-13* s přísadovými prvky nebo bez nich.

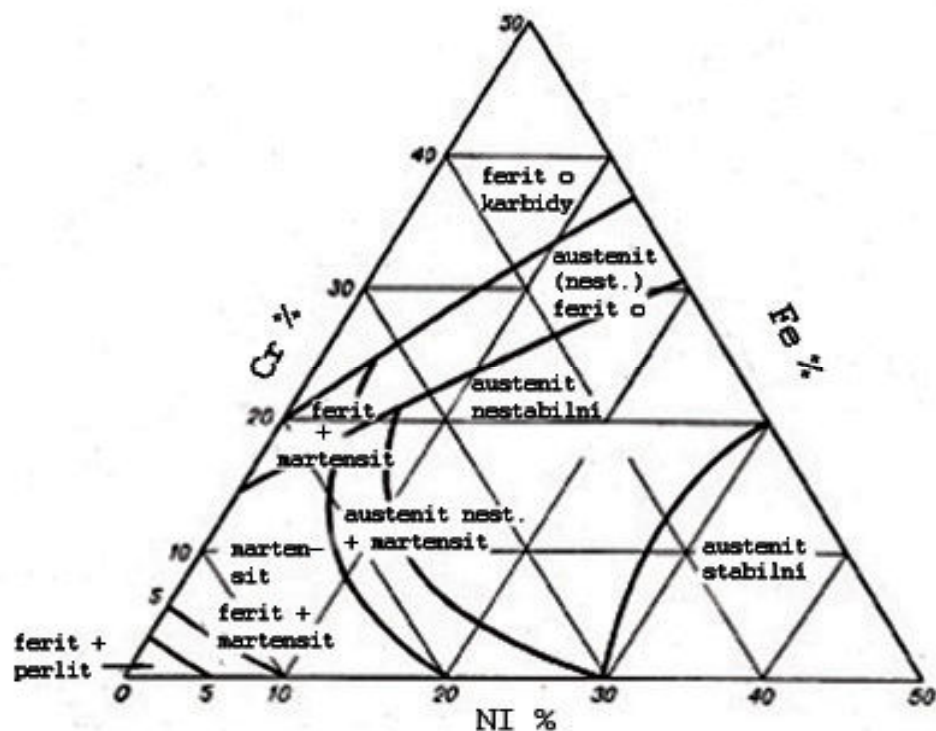
4. *Žáruvzdorné austenitické oceli*, odolné proti vysokým teplotám. Pro tuto oblast se nejvíce používají oceli typu 24Cr-12Ni a 25Cr-20Ni s přísadou nebo bez přísady manganu, molybdenu, niobu atd. [3]

Úloha přísadových prvků

Chrom je základním prvkem charakterizujícím antikoroční žáruvzdorné oceli. Zlepšuje odolnost proti korozi. Je třeba rozlišovat oxidaci za vyšších teplot a elektrochemickou korozi v atmosféře a v různých chemických činidlech. V prvním případě se vytváří na povrchu vrstvička kysličníku chromitého, která ocel chrání před okysličováním. V druhém případě záleží na pasivaci, která se uplatňuje teprve při obsahu 12 až 13% Cr, který u ocelí tohoto typu je důležitým rozhraním mezi ocelemi pasivace schopných a neschopných.

Uhlík je prvek austenitotvorný, jednak rozšiřuje oblast γ slitin železo-chróm a jednak tvoří se sloučeninami železo-chróm několik druhů komplexních karbidů. Ve slitinách s malým obsahem chromu se tvoří cementit obsahující chrom $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, při vysokém obsahu chromu vznikají chromem bohaté karbidy typu $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$, $(\text{CrFe})_{23}\text{C}_6$.

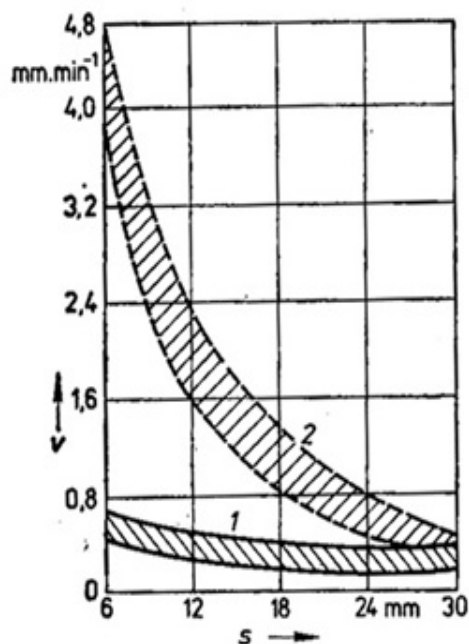
Nikl je jako uhlík prvek austenitotvorný, tj. stabilizátorem austenitické fáze a má snahu zvyšovat prokalitelnost ocelí tím, že snižuje kritickou rychlost kalení. U slitin železo-chróm s 18% chromu přísada niklu rozšiřuje oblast γ , postupně zmenšuje oblast α , oblast α a karbidy a snižuje polohu eutektoidního bodu. [3]



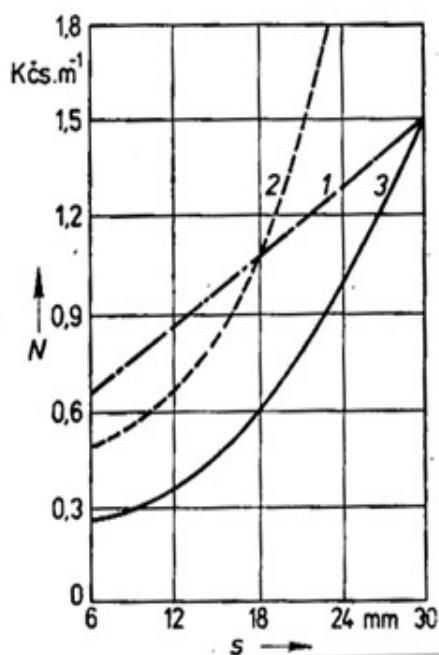
Obr.33:Strukturní složky ternární slitiny železo –nikl-chróm ($C \leq 0,10\%$) po rychlém ochlazení z tekutého stavu. Oceli 18Cr-8Ni leží na hranici oblasti metastabilního austenitu [3]

2.7 Plazmové řezání kovů

Princip spočívá v tavení děleného materiálu extrémně vysokou teplotou, která se tvoří vznikem plazmatu, při přechodu směsi vhodných plynů elektrickým obloukem, hořícím mezi netavící se elektrodou a řezaným materiálem. Tento způsob tepelného dělení byl doposud používán pro oceli, kovy a slitiny, které nebylo možno řezat kyslíkem, zvláště pak pro případ nerezových ocelí a slitin hliníku. Jako plazmového plynu se používá směsi argonu, dusíku a vodíku, popř. stlačeného vzduchu. Při vlastní operaci dochází ke vzniku velkého množství zdraví škodlivého oxidu dusíku, který musí být odsáván. [1]

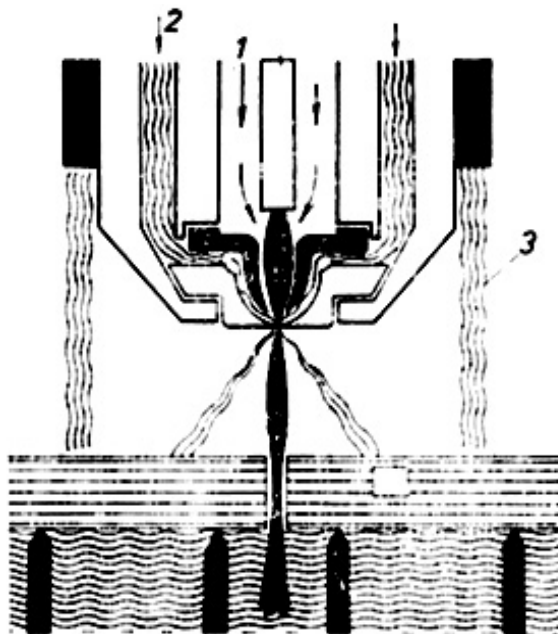


Obr.34: Závislost rychlosti řezání kyslíkem a plazmatem na tloušťce děleného materiálu
 1 – tepelné dělení kyslíkem, 2 – tepelné dělení plazmatem,
 v – rychlost tepelného dělení, s – tloušťka děleného materiálu [1]



Obr.34: Závislost výrobních nákladů na řezané tloušťce při použití různých technologií tepelného dělení materiálu
 1 – kyslíkem, 2 – plazmatem Ar + H₂, 3 – plazmatem se vzduchem, N - výrobní náklady, s – řezaná tloušťka [1]

Se směsí argon-dusík není však kvalita řezu vyhovující. Vzhledem k tomu, že chybí kyslík, není struska dostatečně tekutá a na spodní straně řezné spáry vzniká mnohdy těžko odstranitelný otřep. Stále větší uplatnění nalézá ekonomicky výhodnější plazmové řezání stlačeným vzduchem, při kterém je kvalita řezu uspokojivá. Společným problémem plazmového řezání stále zůstává do značné míry hygiena pracovního prostředí. Na rozdíl od řezání kyslíkem je třeba při použití plazmatu vzít v úvahu vliv záření, teploty a hluku. K uvedeným nepříjemným jevům je nutno ještě přičíst i značný vývin zplodin řezání v plynném a kapalném stavu. Vývin dýmu, aerosolu, včetně nitróznych jedovatých plynů je tak intenzivní, že řezání nelze provádět v běžných provozních prostorách, proto je podmínkou použití výkonných odsávacích zařízení. [1]



Obr.35: Tepelné dělení plazmatem hořákem s vodní sprchou
 1 – plazmový plyn(dusík), 2 – plazmová kapalina (voda),
 3 – vodní sprchový plášť [1]

V této souvislosti bylo zavedeno řezání plazmatem s vodní sprchou. Jako plazmový plyn se používá dusík. Pod neodtavující se elektrodou se ještě bočními vstupními otvory v trysce dostatečně přidává voda. Její současnou disociací na vodík a kyslík vzniká na bázi vhodné plynové směsi svazek plazmatu. Řezaný materiál je uložen na pracovním stole tak, že povrch jeho spodní strany se dotýká hladiny vody (tzv. vodní lůžko). Zplodiny vzniklé řezáním, tj. nitrózní plyny, ozón, výpary kovů, prach apod., jsou zachyceny z velké části vodní sprchou. Kromě toho je částečně

pohlcováno i záření oblouku a snížená hladina hluku v okolí asi o 15dB (fyziologický účinek hluku je tak snížen asi o polovinu). Přidá-li se do vody ještě barvivo, sníží se záření tou měrou, že okolo chodící osoby nejsou zářením ohroženy. Roztavený kov z řezné spáry ve vodě tuhne a ve formě jemného prášku se usazuje na dně pracovního stolu. Rovněž i z technologického hlediska je výhodné, že řezaný materiál zůstává prakticky studený, což se příznivě projevuje na omezení tepelně ovlivněného pásma, snížení vnitřních napětí, a tím i deformací řezaného materiálu. Začíná se dokonce užívat způsobu, při kterém jsou plech i špička řezací trubice umístěny úplně pod vodou, což zcela odstraní hluk a nevzniká žádné záření do okolí. [1]

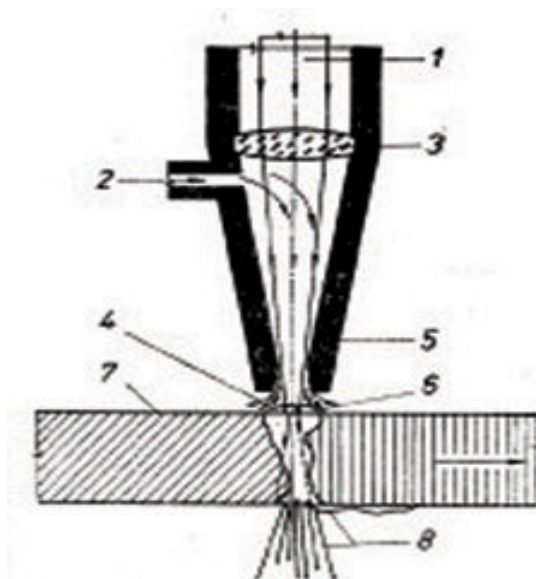
2.8 Řezání laserem

Zdrojem energie pro postupné tavení a odpařování materiálu v řezné spáře je v tomto případě fokusovaný světelný paprsek vznikající v plynové komoře laseru, naplněné směsí $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Při kontinuálním výstupním výkonu (nejčastěji 250, 500 a 1000W) umožňuje světlo laseru řezání tloušťek do 1mm. Přivádíme-li inertní nebo aktivní plyn, je možno řezat materiály o tloušťce několika mm. Provozní údaje o řezání laserem udává tabulka. [1]

Tab.1: Parametry pro tepelné dělení různých materiálů laserem [1]

Materiál	Tloušťka děleného materiálu (mm)	Rychlost tepelného dělení ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) při výkonu	
		250 W	500 W
Polyethylen	5	1000	2000
Polyethylen	20	150	300
PMMA	5	1900	2700
PMMA	20	350	550
Azbest	5	600	1100
Dřevo	18	1500	3000
Překližka (dýhovaná)	12	400	750
Hlubokotažný plech	1	3500	5500
Hlubokotažný plech	3	1200	2100
Ocel 11 370	3	900	1700
Ocel 11 370	5	—	800
Ocel 11 370	6	—	300

Řezatelnost laserem závisí především na absorpci materiálu. Nekovové materiály, jako např. umělé hmoty, pryž, keramika, dřevo apod. absorbují svazek laserového záření poměrně dobře, kdežto kovové materiály už v menší míře. V uvedeném případě podporuje proces řezání přidávaný kyslík. Materiály se silnou odrazivostí světelného záření, jako např. měď a hliník se laserem řezat nedají. [1]



Obr.36: Schéma laserového hořáku pro tepelné dělení

1 – laserové záření, 2 – natečný nebo nízkoaktivní plyn, 3 – středící optika,
4 – výstup plynu, 5 – řezací tryska, 6 – ohnisko, 7 – řezaný materiál
(kovový nebo nekovový), 8 – vyfukovaná tavenina nebo zplyněný materiál [1]

Přednosti řezání laserem: vysoká rychlost řezání, velká škála řezaných materiálů, velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu (nedochází k deformacím), výborná kvalita řezných ploch, velmi úzká řezná mezera (0,2 až 0,3mm), úspora materiálu, malá hmotnost laseru, bezhlučnost provozu, nízké provozní náklady a rozměrová přesnost výpalku (CNC laserová jednotka umožňuje dosažení výrobní tolerance v hodnotě 0,1 až 0,001mm). Pro tyto vlastnosti řezání laserem přibývá na popularitě. Provozní nasazení 500 a 1000W laseru CO₂ vytvořilo reálné podmínky pro jeho využití zvláště v oblasti výroby velkoplošných ocelových konstrukcí. [1]

2.9 Řezání svazkem urychlených elektronů

Praktické využití tohoto způsobu řezání je z operativního hlediska omezené, protože proces je podmíněný vakuováním prostředí. Z tohoto důvodu se v praxi používá pro přesnou výrobu malých otvorů libovolných tvarů.

Svazek elektronů umožňuje řezání extrémně vysokými rychlostmi, především kovových materiálů. Při děrování ocelového plechu tloušťky 4mm je možno zhotovit 10 otvorů za sekundu, v případě plechu tloušťky 0,1mm lze v jedné sekundě vyrobit až 3000 otvorů. Praktické využití řezání svazkem urychlených elektronů je dále omezeno tloušťkou materiálu, která dosahuje hodnoty pouze několika mm. [1]

2.10 Základy nedestruktivních kontrolních metod používaných v oblasti výroby svařovaných konstrukcí

Dodržení požadované jakosti svarů je základním předpokladem provozní bezpečnosti a spolehlivosti svařované konstrukce. Proto je důležité zajistit výrobu svarových spojů s minimálním počtem defektů, avšak s vyloučením těch, které jsou svým charakterem, velikostí nebo četností nepřijatelné z hlediska namáhání a požadované životnosti svařované konstrukce.

Z tohoto důvodu dělíme výrobní kontrolu do čtyř hlavních skupin:

- kontrola před započetím svařování;
- kontrola v průběhu svařovacího procesu;
- kontrola po ukončení výroby svařované konstrukce;
- kontrola při provozování svařované konstrukce.

Nedestruktivní defektoskopickou kontrolu je nutno považovat za součást výrobního procesu. Provádí se zpravidla v té fázi, kdy již dále nedochází k jakékoliv změně materiálové struktury výrobku. Kontrola svarů velkých tlouštěk se při použití vhodných defektoskopických metod zajišťuje i v průběhu jejich postupné výroby. Je to z důvodu snadnějšího a méně nákladného provádění nutných oprav. V podmínkách zavedení účinné kontroly musí být použity všechny účelné, ekonomicky a technicky dostupné a průkazné zkušební metody, umožňující spolehlivé ověření

charakteristických vlastností svarového spoje a včasné odhalení a vyhodnocení skrytých povrchových i vnitřních vad z hlediska jejich přípustnosti ve svařenci. [1]

2.11 Vizuální kontrola svarů (dle ČSN EN 970)

Základní nejjednodušší kontrola pro zjištění povrchových vad. Při této kontrole zkušený defektoskopický pracovník již podle vzhledu povrchu jednotlivých vrstev svaru posuzuje jakost práce svářeče a bývá schopen předložit správné závěry o možnosti výskytu vnitřních vad.

Pokud nejsou z technických a ekonomických důvodů nárokovány jiné defektoskopické metody (prozařování, ultrazvuk apod.), musí být kontrola prohlídkou prováděna s obzvláštní péčí (výhodné je použití lupy; zvětšení 3 až 5x). K namátkovému odkrytí vnitřních vad může být použita pomocná metoda, při které se na požadovaném místě vyvrtá otvor o průměru několika mm, procházející celým svarem, přičemž se vyhodnotí válcová plocha vývrtu a závěrem se otvor opět zavaří. Tato kontrola procházejícím otvorem je možná u slabostěnných svařenců. Je často vhodnější vytvořit drážku sekáčkem, uhlíkovou elektrodou nebo kyslíkoacetylenovým drážkovačem. Drážka se upraví do tvaru vhodného k opravě. [1]

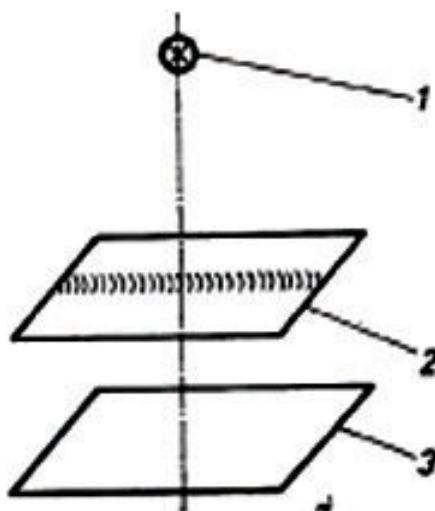
2.12 Zkoušení svarů prozařováním

Hodnocení kontroly svarů prozařováním zajišťuje obor *nedestruktivní kontroly technická radiografie*. Využívá se metody, při které se vhodným detektorem obrazově vyhodnocuje přítomnost vnitřních materiálových vad, a to na základě vznikající diferenciace zeslabení pronikavého záření, procházejícího kontrolovaným svarem. Pro dosažení požadované jakosti radiografického obrazu (ostrost, kontrast, rozlišitelnost detailů), se nejčastěji používá záznam na radiografický film, který je stále považován za nejprůkaznější detektor záření. [1]

V oblasti defektoskopické kontroly prozařováním jde v principu o zobrazovací techniku založenou na zásadách centrální kolmé nebo šikmé projekce objemové

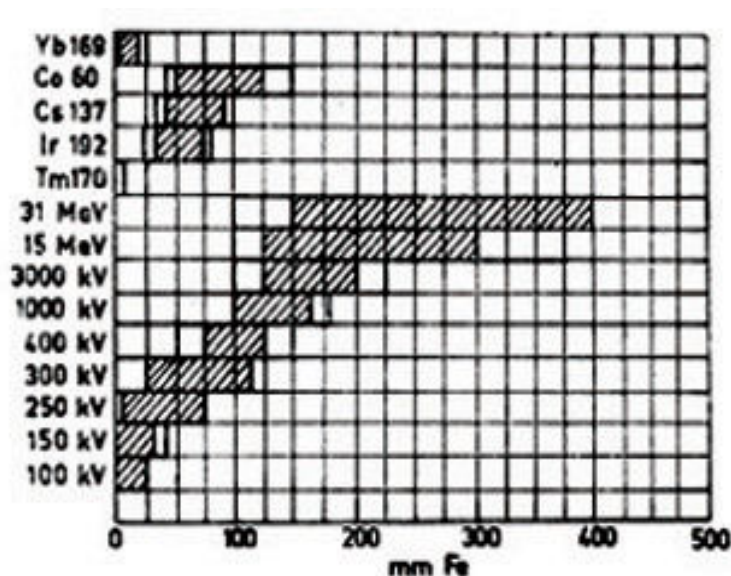
oblasti svarového spoje do roviny, popř. válcové plochy. Vlastní technika prozařování svarů je schematicky znázorněna na obr.37. Zářič umísťujeme vždy v optimální vzdálenosti od svaru a světlotěsnou kazetu s filmem pokud možno těsně k zadnímu povrchu svaru, tj. odvrácenému od zářiče.

Uvedená defektoskopická zkušební metoda vyžaduje pro expozici filmu zpravidla několikaminutové prozařování kontrolovaného předmětu (svarového spoje). V pracovním postupu následuje fotochemické zpracování radiografického materiálu. [1]



Obr.37: Kontrola svarového spoje ionizujícím zářením
1 – zdroj záření, 2 – prozařovaný svar, 3 – detektor záření [1]

Jako vhodný zdroj se v praxi používá záření rentgenové (rentgenky, betatrony, lineární urychlovače), nebo omezeně též složka gama umělých radioaktivních izotopů (radionuklidů). V obou případech jde o záření stejného fyzikálního charakteru (příčné elektromagnetické vlnění) o vlnové délce v rozmezí 10^{-9} až 10^{-10} m, vhodně zvoleného ve vztahu k tloušťce a druhu prozařovaného materiálu svarového spoje. Energie nejčastěji používané v průmyslu, odpovídající uvedeným vlnovým délkám se pohybují v hodnotách 50 keV až 30 MeV. [1]

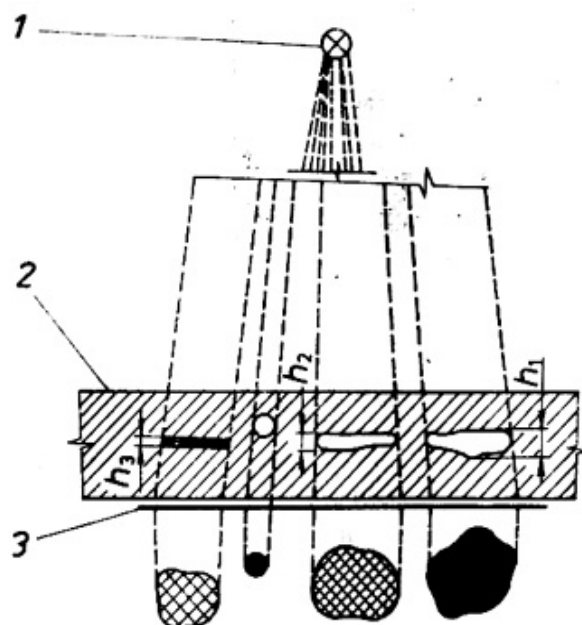


Obr.38: Použitelnost zdrojů při radiografické defektoskopii ocelových součástí [1]

Obrázek vyjadřuje schematicky použitelnost zdrojů pronikavého záření různé tvrdosti při prozařování svarů ocelových materiálů různých tlouštěk.

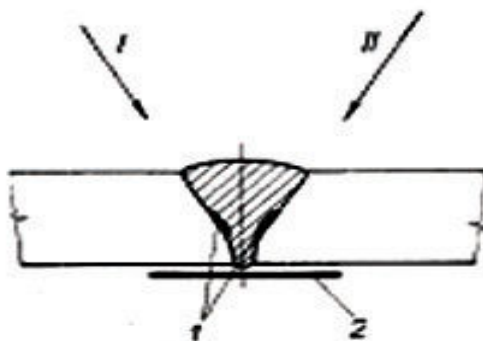
Podstatnou nevýhodou všech v defektoskopii používaných radioizotopových zářičů je okolnost, že radionuklidy vyzařují čistě monochromatické záření, tzv. diskrétní spektrum, což ze stránky radiografické způsobuje měkkost a plochost snímku. Jde o analogii srovnatelnou s fotografií provedenou monochromatickým filtrem, tj. propouštějícím jen velmi úzké spektrum vlnových délek světelného záření. Proto vzhledem k dosažení nejvyšší jakosti radiogramu volíme přednostně zdroje na bázi spojitého spektra rentgenového záření. Použití radioizotopů, zvláště pro kontrolu svarových spojů, představuje pouze náhradní řešení, využitelné zpravidla v montážních podmínkách, kde není k dispozici požadovaný rozvod elektrické energie, nebo se vytvoří i jiné, např. rozměrové závislosti, znesnadňující snímkování rentgenovými aparaturami.

S využitím fyzikálního zákona o rozdílnosti zeslabení pronikavého záření, a to v přímé závislosti na atomové hmotnosti a rozměrových hodnotách prozařovaných strukturních složek, budou nejlépe zaznamenány vady sférického typu. [1]



Obr.39: Radiografické zobrazení materiálových vad
1 – zdroj záření, 2 – prozařovaná součást, 3 – radiografický film, h_1 , h_2 , h_3 – vnitřní vady o různých tloušťkách [1]

Podle obrázku to vyjadřuje případ zobrazení vnitřní materiálové dutiny tloušťky h_1 o nejmenším kontrastu, ve srovnání s obrazy vzduchových dutin menší tloušťky h_2 a h_3 . Tento poznatek současně určuje podmíněnou radiografickou zjistitelnost plošných vad. Je proto nutné, například pro ověřování výskytu studených spojů, provádět postupné snímkování na dva radiogramy, při dílčím směřování svazku záření do rovin předpokládaného polohování hledaných defektů. [1]



Obr.40: Radiografické zobrazení plošných vad na svarových plochách
 I , II – směry záření, 1 – studené spoje, 2 – radiografický film [1]

Prohlížení radiogramu se zásadně provádí až po osušení filmu, řádně vypraném po předchozí, fotochemické reakci. K prosvícení hodnoceného radiogramu se používá říditelný zdroj intenzity světla tzv. negatoskop, který umožňuje, aby fotochemicky zaznamenané vady byly na všech místech radiogramu vždy dostatečně čitelné. Negatoskop musí být současně vybaven pomocným zařízením umožňujícím vyklonit světelné pole tak, aby světlo procházelo pouze vyhodnocovaným úsekem snímku a nikde neoslňovalo.

Vyhodnocováním radiogramu rozumíme stanovení druhu, velikosti, četnosti, vzájemné polohy, orientace a spolupůsobení zjištěných vnitřních nebo povrchových vad. Na tomto podkladě se výsledně určuje tzv. klasifikační (jakostní) stupeň celistvosti svaru (pětistupňová klasifikace). [1]

2.13 Zkoušení svarů ultrazvukem

V oblasti nedestruktivní kontroly svařovaných konstrukcí představuje ultrazvuková defektoskopie jednu z velkých skupin, která nabývá stále na významu. Ultrazvuková kontrolní metoda pracuje výsledně s elektrickým signálem, což umožňuje získat požadované závěrečné kvantitativní vyhodnocení detekovaných vad. Základní rozdělení této zkušební metody můžeme provést na podkladě způsobu podání informace o vnitřním stavu materiálu.

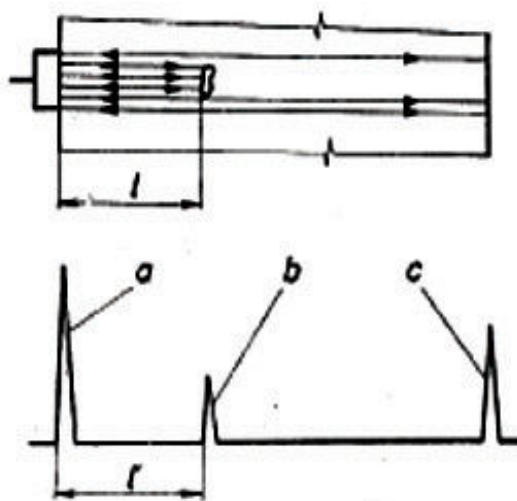
V prvním případě sonda vybavená piezoelektrickým měničem vysílá do materiálu vysokofrekvenční mechanické vlnění pulsního charakteru. Přímocharé šíření ultrazvuku hodnocenou strukturou je v důsledku vzniku náhlých změn akustických vlastností prostředí výsledně ovlivňováno výskytem vnitřních vad. Na hranicích útvarů vnitřních necelistvostí dochází k odrazovým a rozptylovým jevům, které se vyhodnocují v časovém mezipulsním období příjmu. Uvedený způsob defektoskopické kontroly je nejrozšířenější.

V druhém případě se samotná strukturní vada stává vysílajícím zdrojem signálu. Vznik vady nebo její narůstání vyvolává napětíovou vlnu, které se na povrchu zkoušené konstrukce vhodným způsobem snímá a dále zpracovává. Jako ultrazvukový snímač je opět ve většině případů používán piezoelektrický měnič. Tato

metoda se nazývá akustická emise a tvoří druhou hlavní skupinu ultrazvukových nedestruktivních kontrolních metod.

Jako zdroj vlnění se v první skupině ultrazvukové defektoskopie nejčastěji používají piezoelektrické měniče o různé velikosti (5 až 30mm). Pro kontrolu svařovaných konstrukcí jsou využitelné podélné, příčné a povrchové vlny. Obecná možnost volby frekvence se nachází v rozmezí od 0,5 do 30 Mhz, přičemž pro defektoskopii svarů je nejčastěji používáno příčné vlny o frekvenci 2 až 4 Mhz. Vyšší frekvenční rozsahy jsou vhodné pro hodnocení struktury a mechanických vlastností zkoušeného materiálu, dále ke zjišťování náchylnosti oceli k lamelárnímu praskání a k měření hloubky trhlin. Pro potřebu nedestruktivního zkoušení svarů trubek a celistvosti návarů se výhodně využívá ultrazvukové optiky, umožňující fokusaci svazku ultrazvukového vlnění. Hlavní určující parametry ultrazvukových sond jsou: rozměry měniče, pracovní frekvence, šíře vysílaného pásma a úhel, kterým se šíří ultrazvukový svazek zkoušeným materiálem.

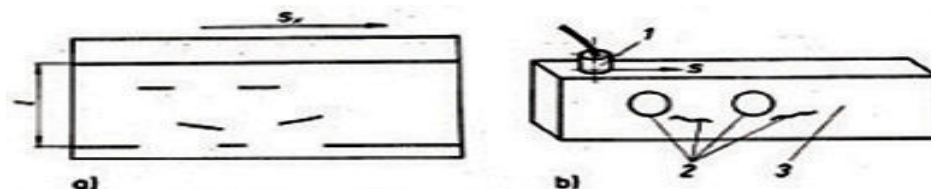
Nejčastější a nejrozšířenější způsob záznamu indikovaného defektu je formou zobrazení A. Jsou jím vybaveny všechny ultrazvukové defektoskopy, a pro tento způsob jsou opracovány všechny normované metody hodnocení vad. Rozšíření uvedeného způsobu je dáno možností vedení ultrazvukové sondy rukou. [1]



Obr.41: Ultrazvukový záznam vady zobrazením A

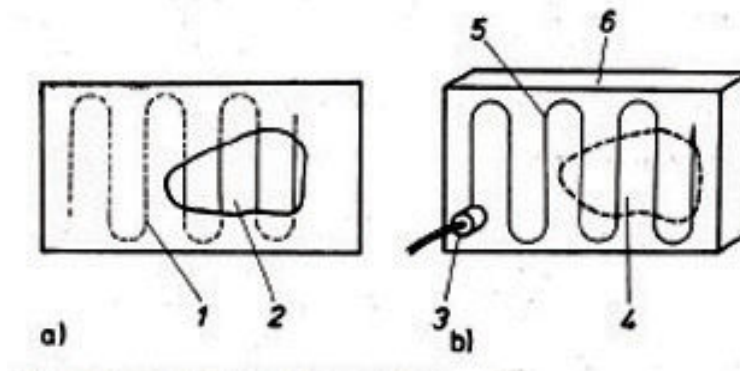
a – počáteční impuls, b – impuls od vady, c – koncový impuls, l – hloubka vady pod povrchem, l_{Δ} - odečtená hodnota hloubkového polohování vady [1]

Pro zobrazení **B** je nutno použít speciální ultrazvukový defektoskop, nebo univerzální defektoskop spojený s počítačem, do něhož vstupuje též údaj o poloze sondy (jedna souřadnice). Zjištěné vady se zaznamenávají na obrazovce nebo s použitím zapisovače (vhodné pro kontrolu tlustostěnných svarů). [1]



Obr.42: Ultrazvukový záznam vad zobrazením **B**
a) obrazový záznam zkoušky, b) provedení zkoušky 1 – hloubkový údaj, s_x – parametr polohy sondy, s – směr posuvu sondy, 1 – ultrazvuková sonda, 2 – vnitřní vady, 3 – zkoušená součást [1]

Zobrazení **C** podobající se radiografickému záznamu, podává informaci o přítomnosti vad formou průměrového obrazu ve sledované rovině (vrstvě). Na rozdíl od zobrazovací metody **B** je nutno zpracovat údaj o poloze ultrazvukové sondy ve dvou souřadnicích. K rozšířenímu uplatnění této zkušební metody dochází v jaderné energetice. [1]



Obr.43: Ultrazvukový záznam vad zobrazením **C**
a) záznam zkoušky, b) provedení zkoušky 1 – dráhy elektronového paprsku na obrazovce, 2 – zobrazení defektu, 3 – ultrazvuková sonda (vysílá ultrazvukové vlnění kolmo do zkoušené součásti), 4 – vnitřní vada, 5 – dráha pohybu sondy, 6 – zkoušená součást [1]

S rozvojem zavedení číslicového zpracování měřených hodnot nabývá na významu sledování koncového bodu poruchového echa při pohybu sondy nad strukturní vadou. Uvedený způsob hodnocení se například používá při provozních prohlídkách tlakové nádoby reaktoru, kdy ze změn tvaru obalové křivky koncových

bodů poruchových ech můžeme usoudit na případný růst sledovaného defektu. Obalové křivky jsou typické pro různé základní tvary vad, což má potřebný význam pro rozlišení charakteru necelistvosti (např. plošné nebo objemové vady).

Ultrazvuková kontrolní metoda je velmi citlivá a s její pomocí lze zjišťovat nejzávažnější defekty svaru (trhliny, studené spoje, kořenové vady), při dané možnosti hodnocení hrubosti a nestejnomyšnosti materiálové struktury. Kontrolní svazek ultrazvukového vlnění je nejvýrazněji ovlivňován plošnými vadami, které jsou orientovány kolmo k postupující ultrazvukové vlně. Další ovlivnění pro šíření této vlny je vázáno na druh, tvar, rozměry a charakter defektu. Bezpečně mohou být zjištěny všechny vady, které zpětně odrážejí alespoň 5% vysílané energie.

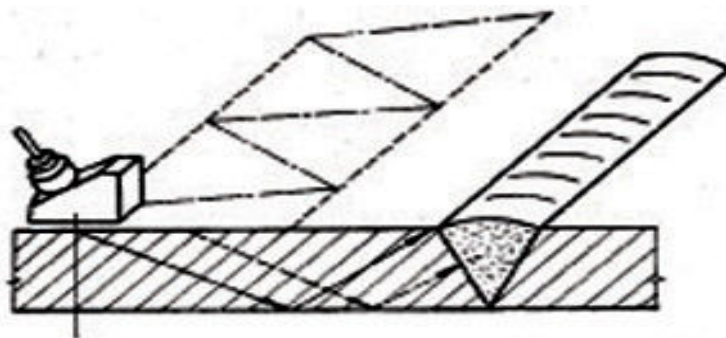
Ultrazvuková defektoskopie je rychlá a levnější než prozařovací metody. Její nevýhodou (pokud není automatizovaná) je značná závislost na zkušenostech a pečlivosti zkoušejícího, a hlavně to, že nepodává tak názorný obraz o charakteru vady jako radiogram. V tabulce jsou základní defekty vyskytující se ve svaru. Jak je zřejmé, citlivost ultrazvukové zkušební metody vzrůstá souhlasně se závažností vad, zatímco u radiografie klesá. [1]

Druh vady	Závažnost vady	Citlivost ultrazvukové metody	Citlivost radiografické metody
Trhliny Studený spoj Neprovařený kořen Vměstky strusky Bubliny a póry	↑	↑	↓

Obr.44: Citlivost radiografické a ultrazvukové defektoskopie k indikaci základních vad svarových spojů [1]

Metoda ultrazvukového zkoušení druhů a typů svarů je převážně vázána na použití určité vybrané techniky ultrazvukové defektoskopie. U tavných svarů se z důvodů převýšení a nepravidelnosti krycí housenky nejlépe pracuje s úhlovou sondou (příčná ultrazvuková vlna, metoda zobrazení A). Podle tloušťky prozvučovaného materiálu a vzdálenosti sondy od svaru prochází šikmo orientovaný svazek ultrazvukového vlnění svarovým kovem buď přímo, nebo až po jednom, popřípadě i více obrazech

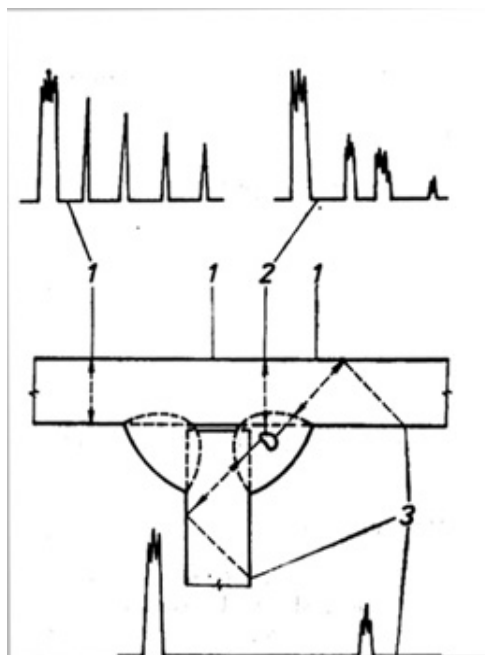
na stěnách kontrolované součásti. Mluvíme pak o zkoušení přímém, nebo prvním popř. vícenásobným obrazem. [1]



Obr.45: Metoda zkoušení svarového spoje příčnou ultrazvukovou vlnou prvním odrazem [1]

Zkoušení přímé se používá při kontrole svarů o tloušťkách větších než 100 mm, popř. i na menších tloušťkách v kombinaci se zkoušením prvním obrazem. Nejčastější způsob, který umožňuje dokonalé prostředí celé výšky svaru, je zkoušení prvním obrazem. Používá se v případech bezpečného zjištění vad, které by vlivem nevhodné orientace unikly při zkoušení přímém. Uvedeným způsobem lze nejlépe kontrolovat svary v rozmezí tlouštěk 15 až 40 mm, v některých případech až do 100 mm.

Zkoušení druhým a vícenásobným obrazem se používá především u svarů o malých tloušťkách (5 až 15 mm), kdy nelze obvykle zkoušení prvním obrazem provést, vzhledem k rozměrům použité sondy. Obrázek znázorňuje příklad ultrazvukové defektoskopie oboustranného koutového svaru za použití čelní a úhlové sondy. [1]



Obr.46: Metoda ultrazvukové defektoskopie koutového svaru
 1, 2 – použití čelní sondy (včetně zobrazení indikace vad),
 3 – použití úhlové sondy (včetně indikace vady) [1]

U velkých vad se postupně vyhledávají jejich hranice, k čemuž slouží sledování poklesu poruchového echa o určitou úroveň. V případě výskytu malých defektů je kritériem pro jejich kvantitativní hodnocení porovnání výšky poruchového echa s výškou echa od definovaného umělého kruhového vývrtu. Při požadavku stanovení délky povrchových trhlin je výhodné použití sondy povrchových vln. Ve všech uvedených případech je nutno provést počáteční kalibraci ultrazvukového defektoskopu. K tomuto úkonu, jakož i k provádění vlastní ultrazvukové defektoskopie, slouží celá řada pomocných kontrolních měrek a vyhodnocovacích diagramů, z nichž některé jsou normalizovány.

Klasifikace jakosti svarového spoje je pětistupňová. Stanovuje se podle výsledků ultrazvukové zkoušky na základě předchozího určení velikosti a četnosti hodnocených vad.

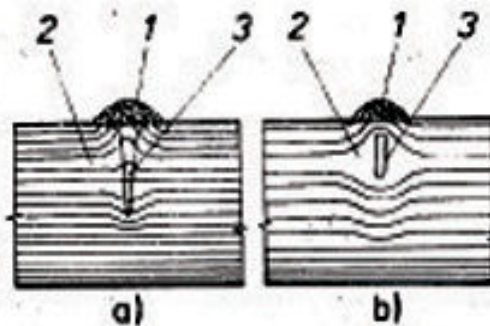
Dalším zkušební metodou je metoda zkoušení svarů akustickou emisí. Metoda je vhodná pro kontrolu celistvosti základního materiálu a svarových spojů, při dané možnosti zjišťování vzniku a šíření nebezpečných vad. S výhodou se používá např. při atestačních zkouškách svařovaných tlakových nádob. Jejím prostřednictvím je též možno realizovat průběžnou kontrolu konstrukčních celků v době jejich provozu. Je nutno připomenout, že metoda je vhodná pouze pro zjišťování defektů ve stadiu

jejich tvorby a případného dalšího růstu, nikoliv tedy pro detekci statických útvarů necelistvosti. Odečtením časového rozdílu průchodu signálu soustavou vhodně rozmístěných ultrazvukových snímačů je možno v závěru přesně lokalizovat polohu zdroje emise, a tudíž místo, kde dochází ke vzniku a k dalšímu šíření indikované poruchy. [1]

2.14 Zkoušení magnetickou práškovou metodou

Vady ve svarech typu povrchových trhlin jsou prozařovacími metodami jen podmíněně zjistitelné, přičemž výsledek je i při správně zvolené technice snímkování problematický. Proto se trhliny zjišťují především magnetickou práškovou metodou na feromagnetických materiálech a metodami kapilárními na materiálech nemagnetických. Oba jmenované kontrolní způsoby jsou spolehlivější, zejména při odhalování povrchových necelistvostí.

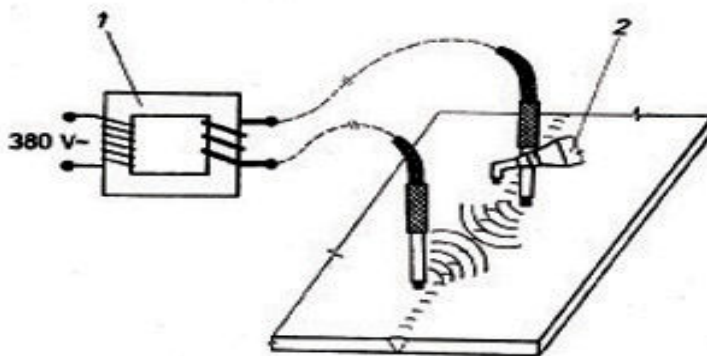
Zmagnetizovaný předmět vytváří v místech porušení celistvosti struktury malá rozptylová magnetická pole. Předpokladem ovšem je, aby směry magnetického pole a necelistvosti byly na sebe alespoň přibližně kolmé. Posypem-li se hodnocená součást magnetickým práškem, ulpí prášek přitažlivou silou rozptylového magnetického pole na necelistvosti a vytvoří tzv. indikaci vady. Jde o shluk zrněk prášku, který sleduje obrysy necelistvosti, a tak vytváří její obraz na povrchu předmětu. Z ostatních míst povrchu, kam není prášek přitahován, je ho možno odstranit odklepnutím výrobku nebo odfouknout stlačeným vzduchem. Indikace vady se vytvoří i v takových případech, kdy je necelistvost tak sevřená a úzká, že ji nelze ani na vyleštěném povrchu okem zpozorovat. [1]



Obr.47: Indikace vady magnetickou metodou práškovou
a) indikace povrchové vady, b) indikace vnitřní vady 1 – feromagnetický prášek,
2 – siločáry magnetického toku, 3 – vada [1]

Citlivější způsob než uvedené hodnocení strukturní celistvosti suchým práškem umožňuje zkoušení tzv. detekčními tekutinami. Jde o suspenze jemného magnetického prášku (železový prach, magnetické oxidy železa Fe_3O_4 – velikost zrněk 3 až $10\ \mu\text{m}$) v nosné tekutině, obvykle směsi oleje a petroleje nebo vodních mýdlových roztocích. Postup při zkoušce je obdobný jako u „suché“ metody. Hodnocená součást se vhodně zmagnetuje (proudová a pólová magnetizace) a polévá detekční tekutinou. Ta stéká po jejím povrchu a odplavuje zrnka prášku ze všech míst, kromě těch, kde se zachytil prášek vlivem rozptylových magnetických polí vytvořených necelistvostí.

I když je na první pohled zkouška jednoduchá a levná, je třeba pro její správné a úspěšné použití znát četné činitele, ovlivňující konečný výsledek, jako je např. druh a stáří detekční kapaliny, způsob magnetizace, volby zkušebního zařízení apod. Proudová magnetizace zajišťuje nejcitlivější indikaci těch vad, které jsou orientovány ve směru spojnice míst dotyku elektrod. Tato metoda zpravidla indikuje rozhraní magnetického a nemagnetického materiálu. V případě heterogenních svarových spojů nebo návarů je nutno tuto metodu kombinovat s jinými metodami (např. metodou kapilární) pro vyloučení falešných indikací. [1]

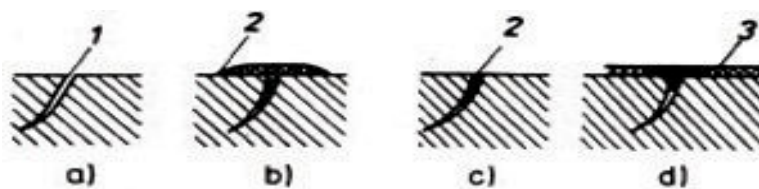


Obr.48: Magnetizace průchodem střídavého proudu
 1 – proudový transformátor 380 V / (5 až 10) V, (500 až 1000),
 2 – nádoba s magnetizační tekutinou [1]

2.15 Zkoušení metodou kapilární

Metoda kapilární umožňuje zjištění pouze necelistvostí, souvisejících s povrchem, ale je využitelná i pro zkoušení materiálů nemagnetických. Ve srovnání s magnetickými práškovými metodami jsou kapilární metody méně spolehlivé, protože jejich úspěšné použití předpokládá, že necelistvost je při povrchu otevřená.

Princip spočívá v tom, že detekční tekutina se nanese na zkoušený, řádně očištěný a odmaštěný materiál, nebo se kontrolovaná součást do ní potopí a nechá určitou dobu působit. Přitom detekční kapalina (nejčastěji barevná nebo fluorescenční) vnikne působením kapilárních sil do povrchových necelistvostí. V následující operaci se všechna detekční tekutina dokonale odstraní z povrchu součásti a vodním proudem nebo otřením (kritická fáze, neboť při nedostatečném odstranění detekční kapaliny z povrchových nerovností svaru vznikají nepravé indikace) a nanese se na něj tzv. vývojka. Je to buď prášek, nebo suspenze bílého prášku v těkavé látce, která se na hodnocený povrch naprašuje. Vytvoří se tak tenká vrstva, která má sací účinky a napomáhá zpětnému vztlínání detekční tekutiny z necelistvostí na povrch. Na bílém nánosu vývojky se pak vadná místa výrobku projeví změnou barvy nebo fluorescencí. Podle vzniklé indikace je možno závěrem posoudit rozměry a charakter zjištěné necelistvosti. [1]



Obr.49: Metoda kapilárních defektoskopických povrchových vad
a – povrch před nanesením kapaliny, *b* – po nanesení kapaliny, *c* – po otření
 povrchu, *d* – po nanesení detekčního prášku, *1* – trhlina, *2* – indikační kapalina,
3 – detekční látka [1]

3 Experimentální část

3.1 Kotel Terminátor 2 (20-30kW)



Obr.50: Kotel Terminátor 2 (20-30kW)



Obr.51: Kotel Terminátor 2 (20-30kW)



Obr.52: Svařování kotle Terminátor 2 (nerezový vnitřní plášť kotle)



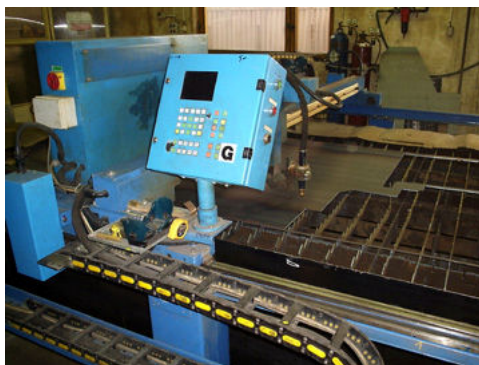
Obr.53: Svařování kotle Terminátor 2 (výměník + vnitřní plášť)

3.2 Plazmové řezání kovů

U této metody řezání plechů jsem se zaměřil na pláště kotlů kde se vyskytují nejvíce nepřesnosti vzniklé řezáním. Ve firmě O.K.STAVEBNÍ se používá již starší typ agregátu od výrobce *Kjellberg* typu PA-S 47 CNC a hořák PB-S 47 W-/O₂. Jelikož stroj funguje ve firmě O.K.STAVEBNÍ přes 5 let, tak zásadním faktorem podporujícím výskyt rozměrových nepřesností jako jsou např. kruhovitost, kolmost atd., je opotřebenost pojezdů v rovinách x a y. Opotřebování pojezdů také způsobuje "zubatost", která je patrná na doloženém vzorku. Dalším výrazným negativním faktorem u řezání plazmou jsou okraje, které vyžadují další nadbytečné operace s polotovarem. Při proměření pláště jsem zjistil, že takřka nelze vyříznout kruhovitý otvor, dále jsem naměřil rozměrové úchylnky tvarů.



Obr.54: Agregát plazmy S67 W CNC



Obr.55: Plazma typu S67 W CNC

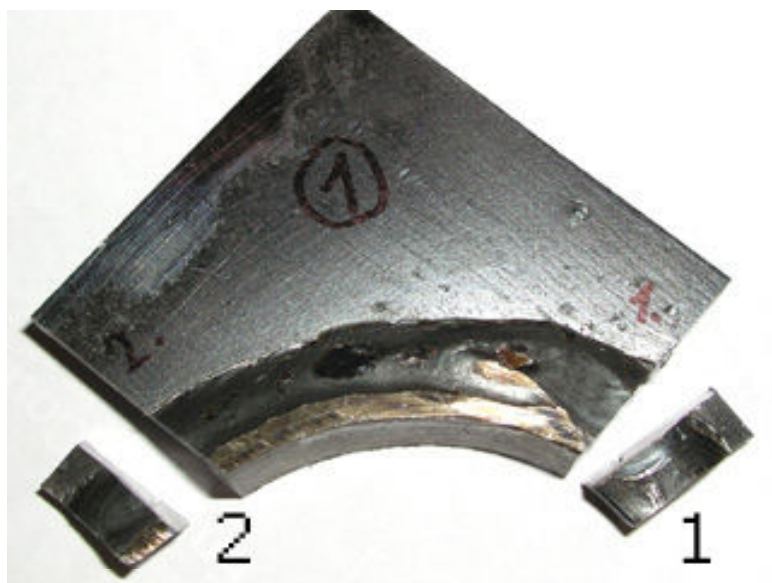


Obr.56: Hořák plazmy PB-S 47 W-/O₂



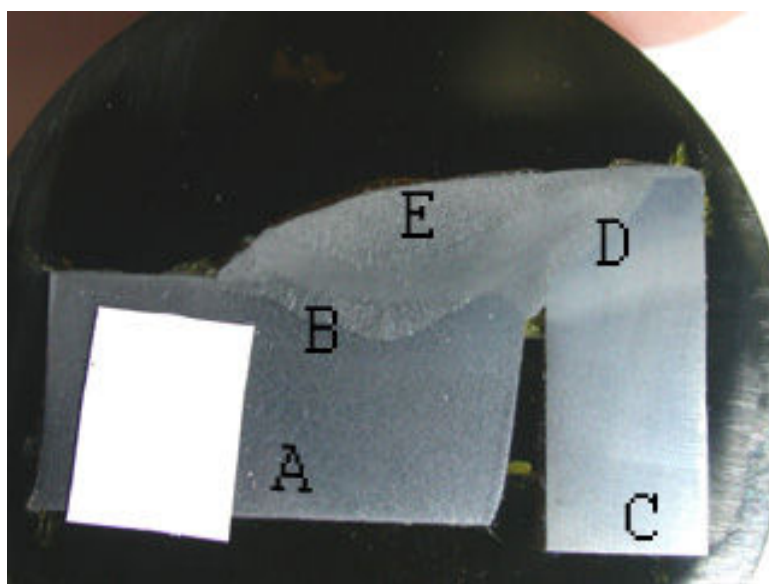
Obr.57: Okraje po řezání otvorů plazmou

3.3 Metalografie svaru, přechodové oblasti a základního materiálu

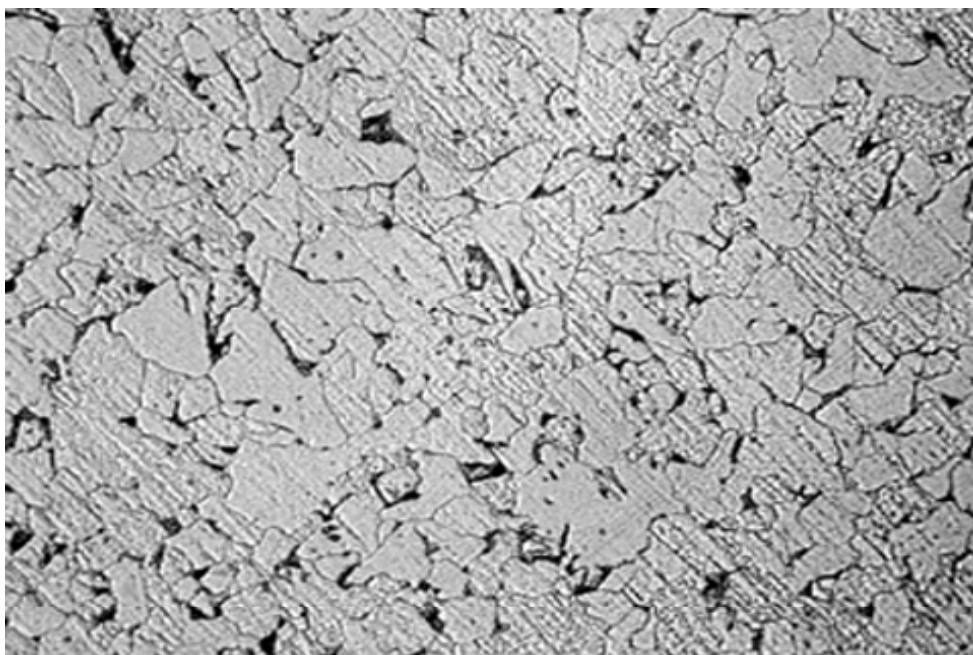


Obr.58: Základní vzorek

Vzorek 1,2 byl svařen metodou MAG,přídavný materiál EN G3Si1 ø1,2



Obr.59: Detail základního vzorku 1



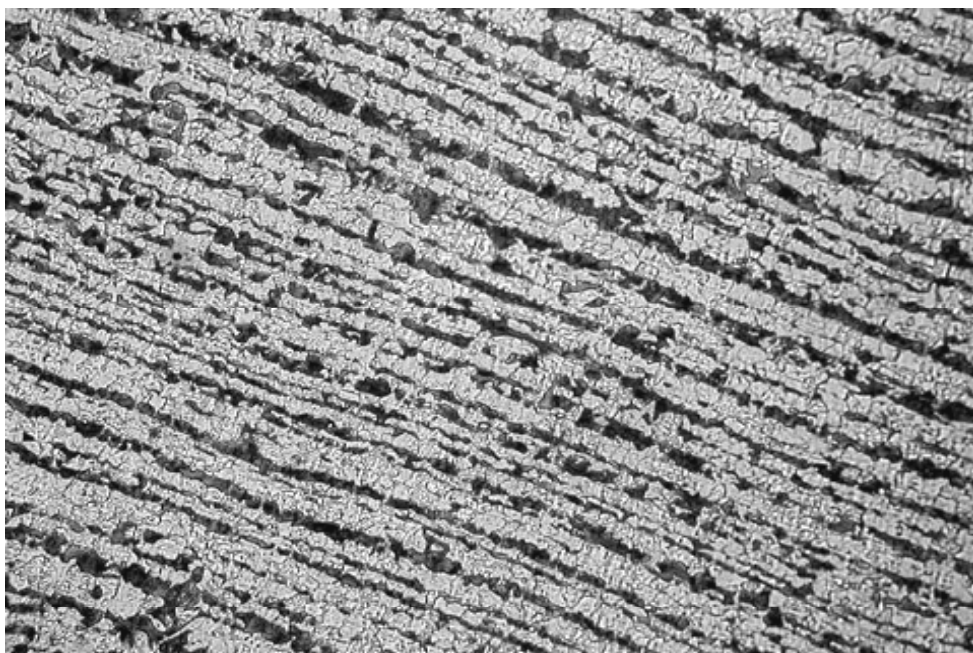
NITAL Obr.60: Základní materiál A (EN 10027.1 S235JRG2) 200x

Zhrublé feritické zrno, místy přesycené feritické zrno. Vyskytují se zrnka perlitu.



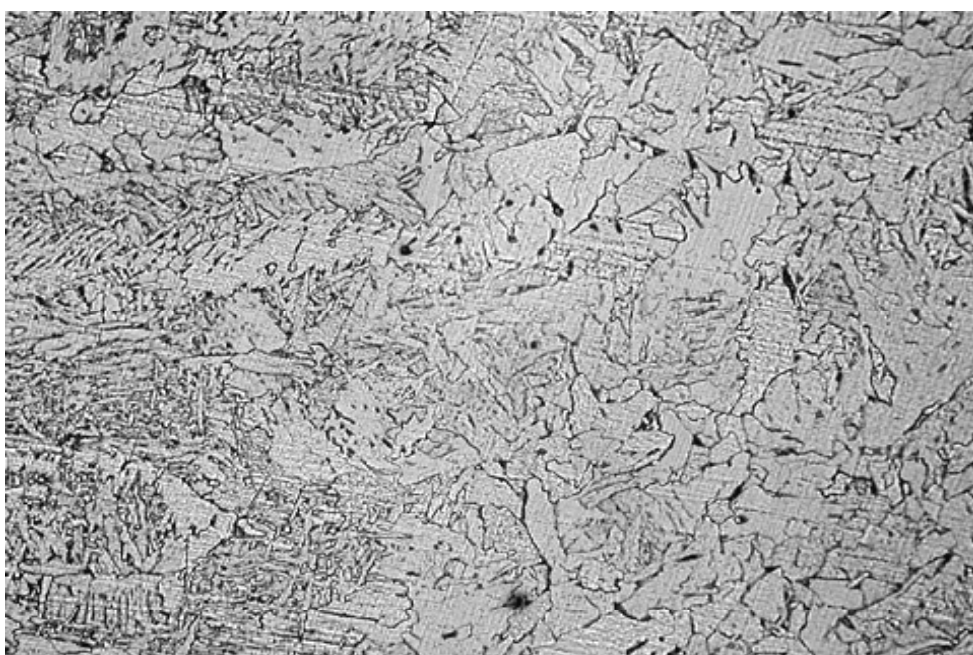
NITAL Obr.61: Přejchod do svaru B 200x

Čistě feritická struktura, poměrně jemnozrnná (minimum perlitu).
Neprojevuje se řádkovitost



NITAL Obr.62: Základní materiál C (EN 10027.1 S355J2H) 200x

Výrazně řádkovitá feriticko perlitická struktura, perlit přechodového typu – nejsou patrné lamely.



NITAL Obr.63: Přechodová vrstva do svaru D 200x

Struktura bainitického charakteru.

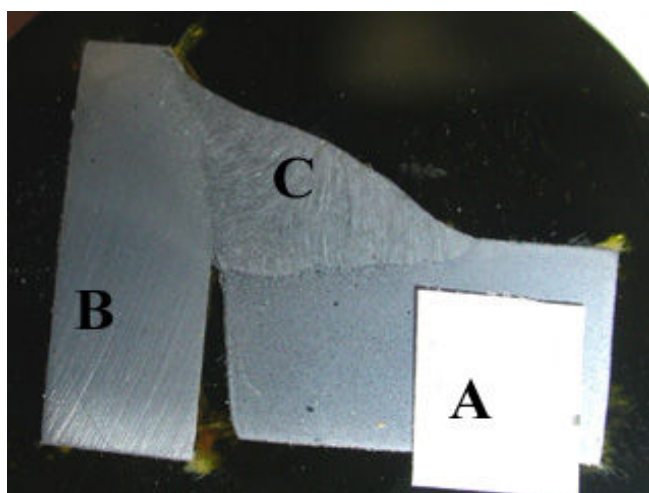


NITAL

Obr.64: Svarová oblast E

200x

Výrazně jehlicovitá licí struktura, hrubé a místy jemné jehlice feritu.

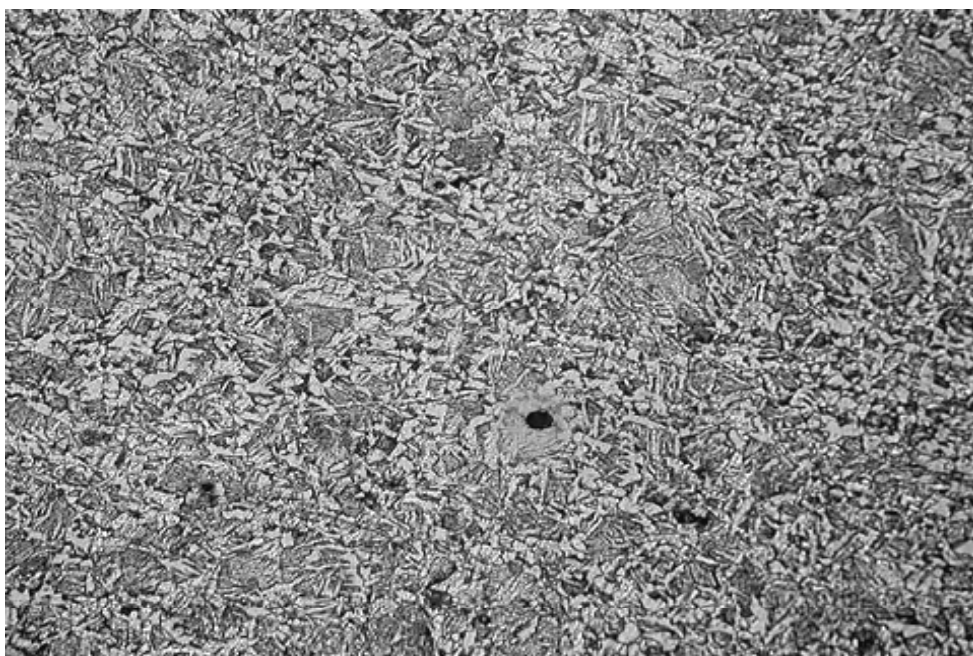


Obr.65: Detail základního vzorku 2



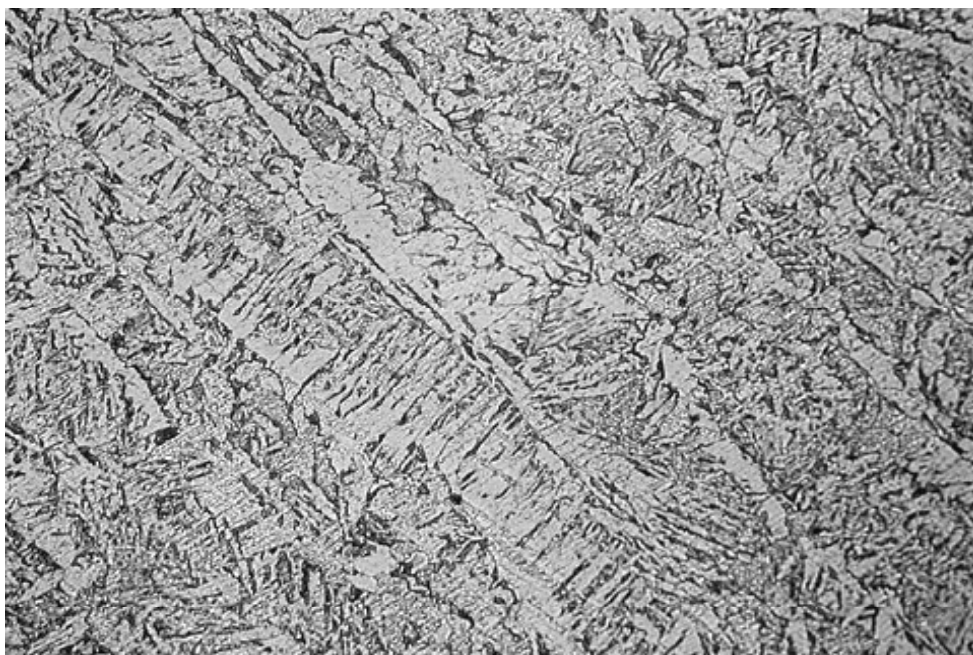
NITAL Obr.66: Základní materiál A (EN 10027.1 S235JRG2) 200x

Feriticko perlitická struktura. Objevují se zrníčka perlitu.



NITAL Obr.67: Přechodová vrstva do svaru B 200x

Jemná struktura bainitického charakteru.



NITAL Obr.68: Svarová oblast C (EN10027.1 S355J2H) 200x

Licí struktura svarového kovu s výraznými dentrity.

Gradient tvrdosti vzorku 2

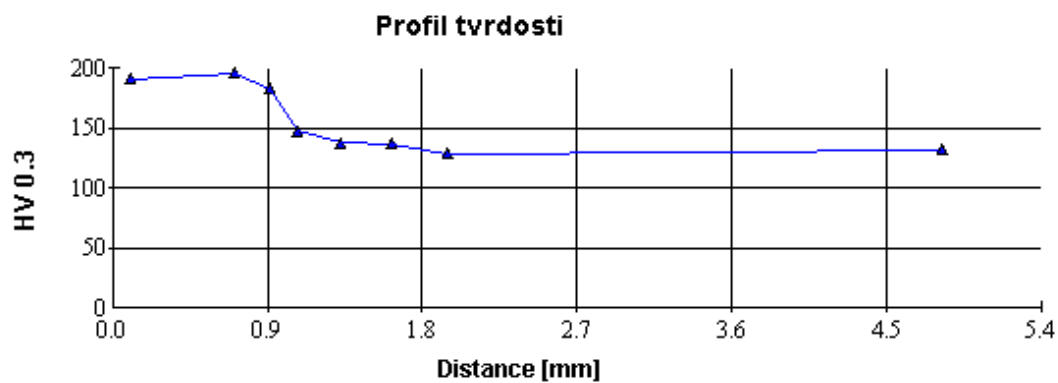
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

Vzorek 2 - gradient do základního materiálu A (EN 10027.1 S235JRG2)

	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	101.6	191.1	53.8	54.1	54.0
2	708.4	196.0	53.3	53.3	53.3
3	912.7	183.1	54.1	56.1	55.1
4	1073.5	148.0	60.4	62.2	61.3
5	1323.1	137.7	64.1	63.1	63.6
6	1623.1	137.2	63.3	64.1	63.7
7	1945.7	128.7	65.2	66.3	65.8
8	4824.4	132.3	64.2	65.5	64.8

Minimum: 128.7
Průměr: 156.8
StDev: 28.340

Maximum: 196.0
Medián: 142.8



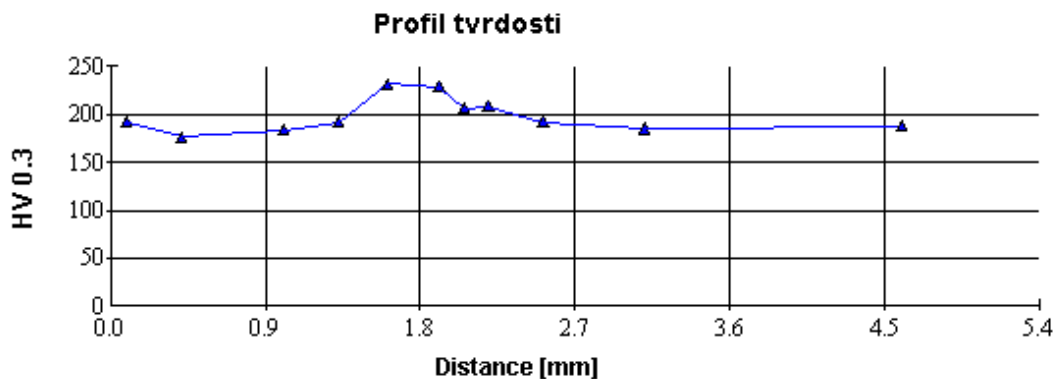
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

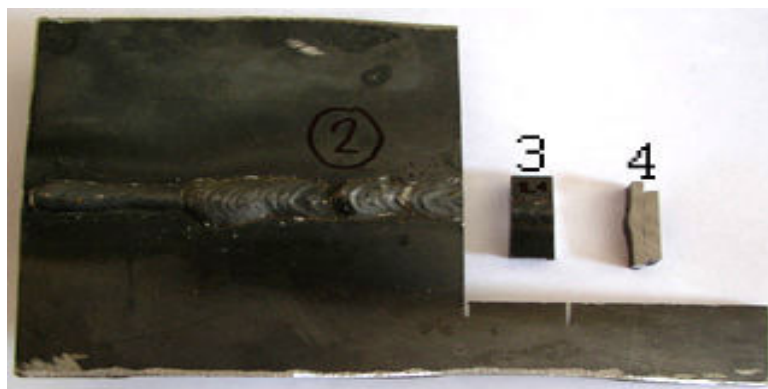
Vzorek 2 - gradient do základního materiálu B (EN 10027.1 S355J2H)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	94.0	191.6	53.5	54.3	53.9
2	410.9	176.0	55.3	57.1	56.2
3	1006.3	183.9	55.1	54.9	55.0
4	1323.1	191.7	53.5	54.3	53.9
5	1610.0	231.8	48.8	49.2	49.0
6	1909.8	229.0	48.8	49.8	49.3
7	2053.4	206.1	51.7	52.3	52.0
8	2194.4	208.5	51.0	52.3	51.6
9	2514.7	191.6	53.7	54.1	53.9
10	3106.2	185.3	54.5	55.1	54.8
11	4599.8	188.2	54.1	54.7	54.4

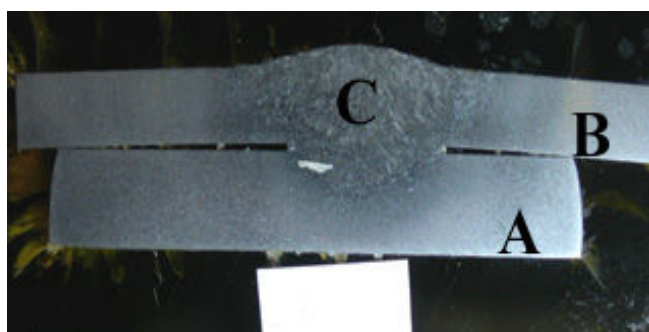
Minimum: 176.0
Průměr: 198.5
StDev: 18.280

Maximum: 231.8
Medián: 191.6

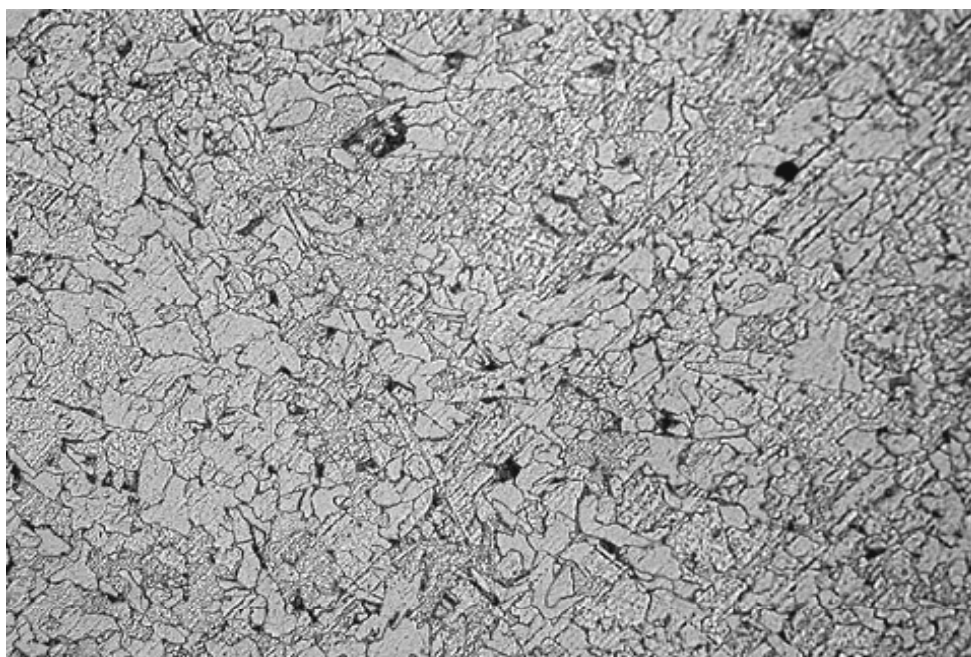




Obr.69: Základní vzorek
Vzorek 3,4 byl svařen metodou MAG,přídavný materiál EN G3Si1 \varnothing 1,2



Obr.70: Detail základního vzorku 3 (EN 10027.1 S235JRG2)

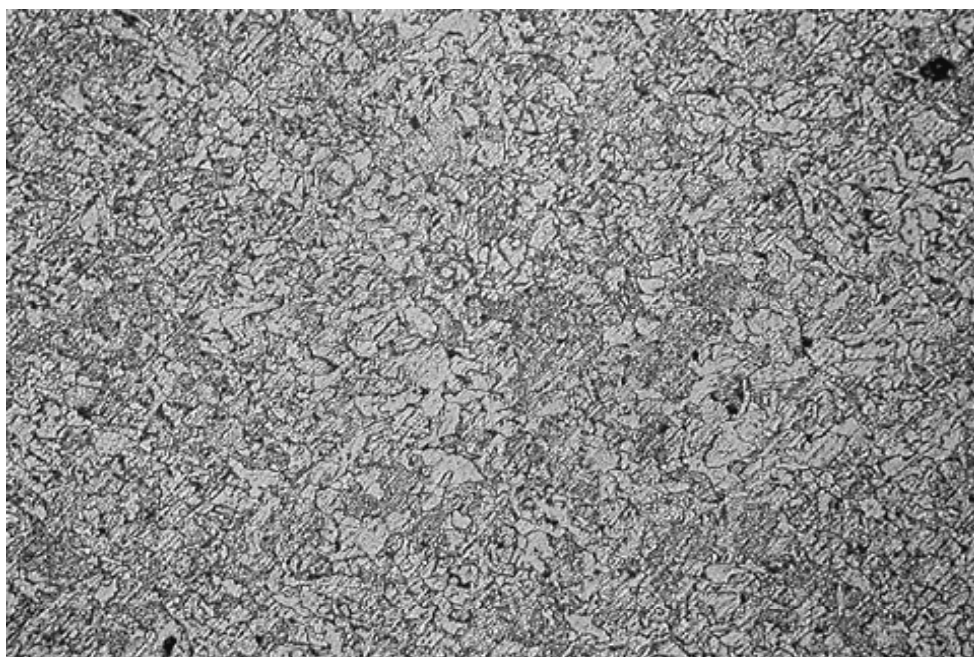


NITAL

Obr.71: Základní materiál A

200x

Místy čistě feritická struktura, místy přesycená feritická zrna a drobná zrna perlitu.

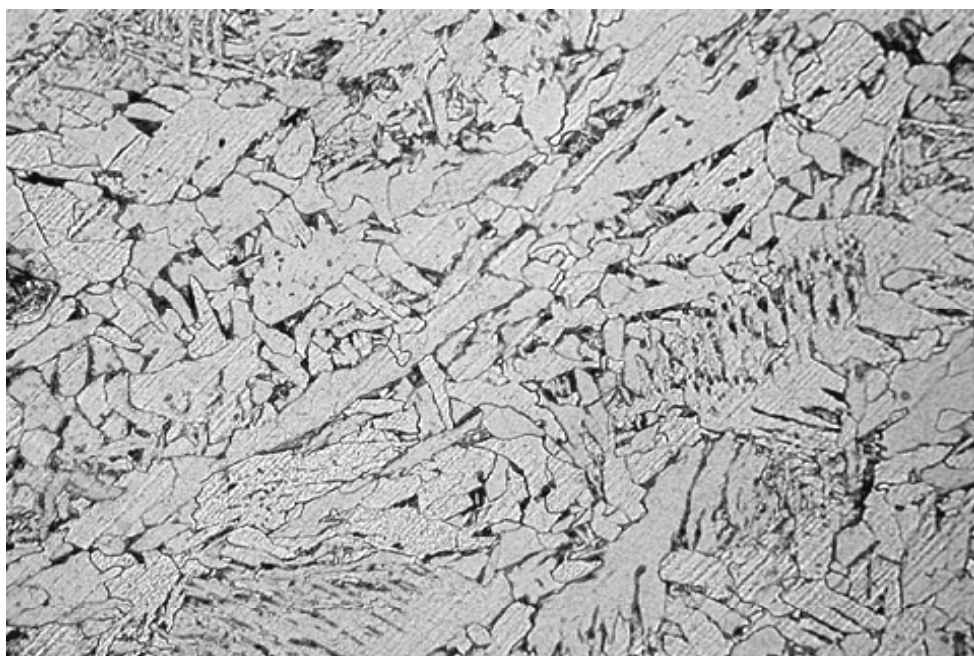


NITAL

Obr.72: Základní materiál B

200x

Místy čistě feritická jemná struktura, vyšší podíl přesycených feritických zrn a drobná zrna perlitu.

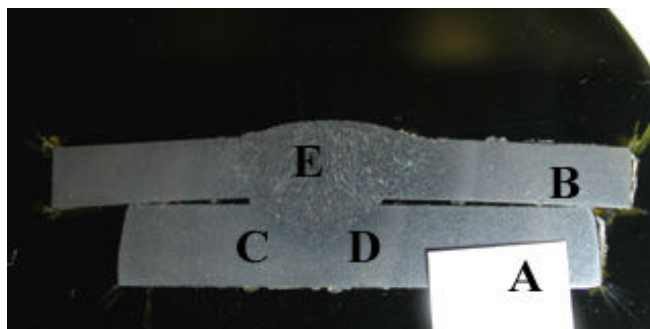


NITAL

Obr.73: Svarová oblast C

200x

Licí feritická struktura svarového kovu s výraznými osami dendritů, poměrně hrubé zrna.



Obr.74: Detail základního vzorku 4 (EN 10027.1 S235JRG2)

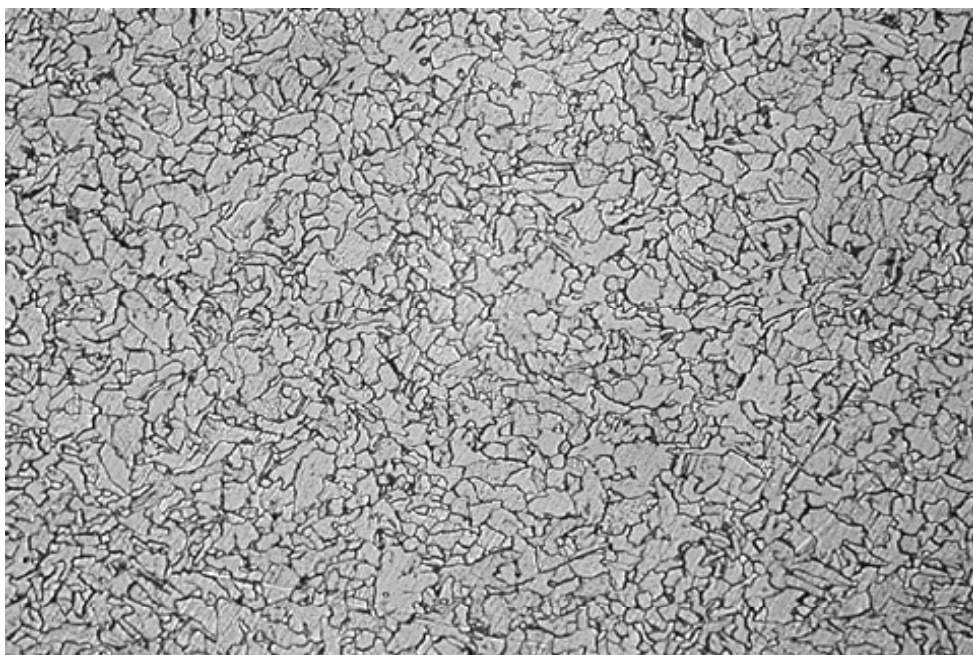


NITAL

Obr.75: Základní materiál A

200x

Téměř čistě feritická struktura, bez známek řádkovité deformace.

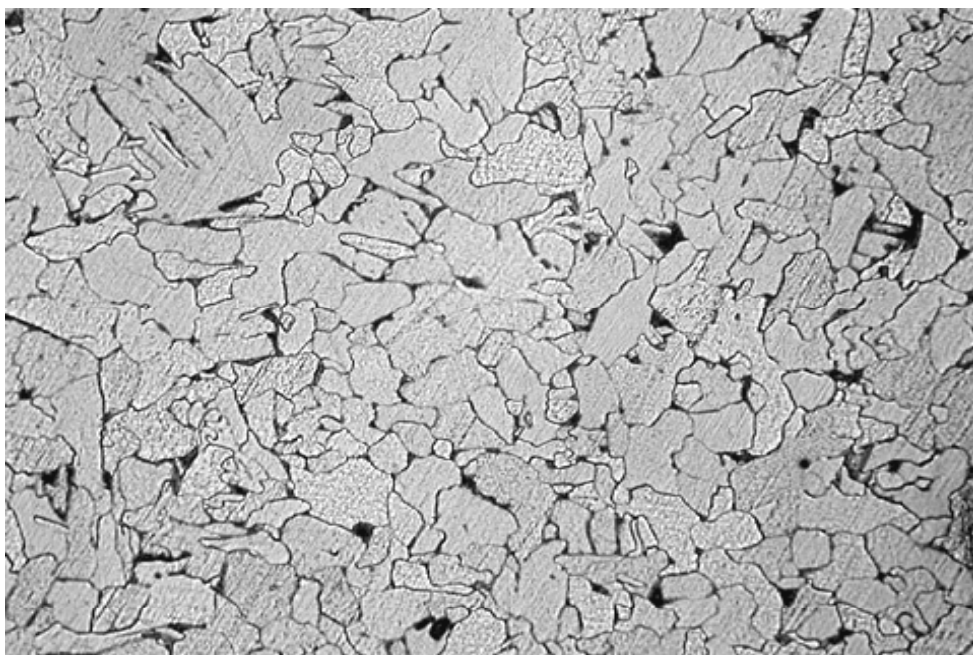


NITAL

Obr.76: Základní materiál B

200x

Čistě feritická, jemnozrná struktura bez řádkovitosti.

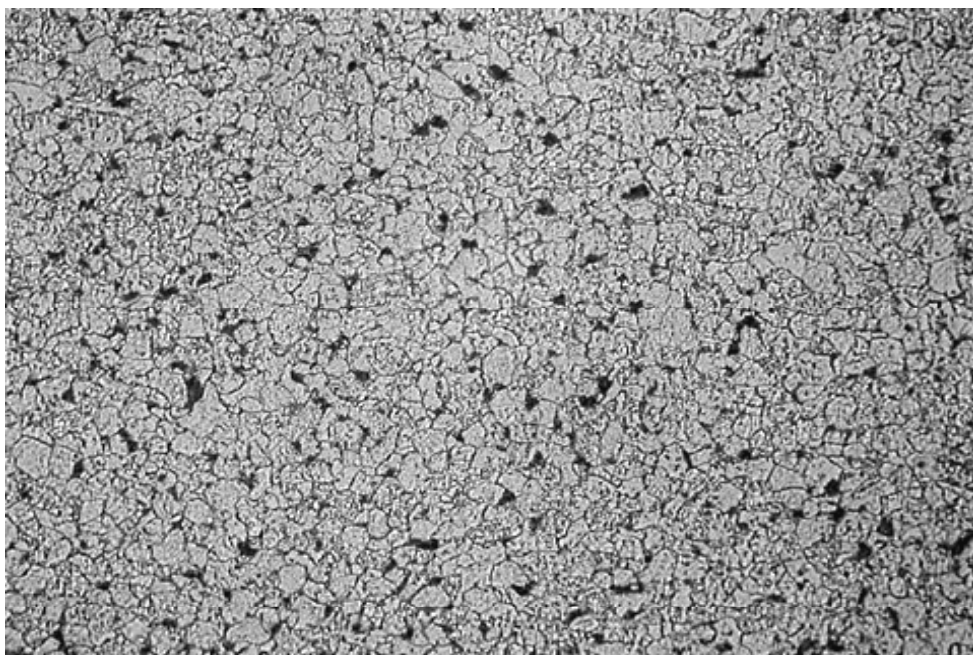


NITAL

Obr.77: Přechodová vrstva do svaru C

200x

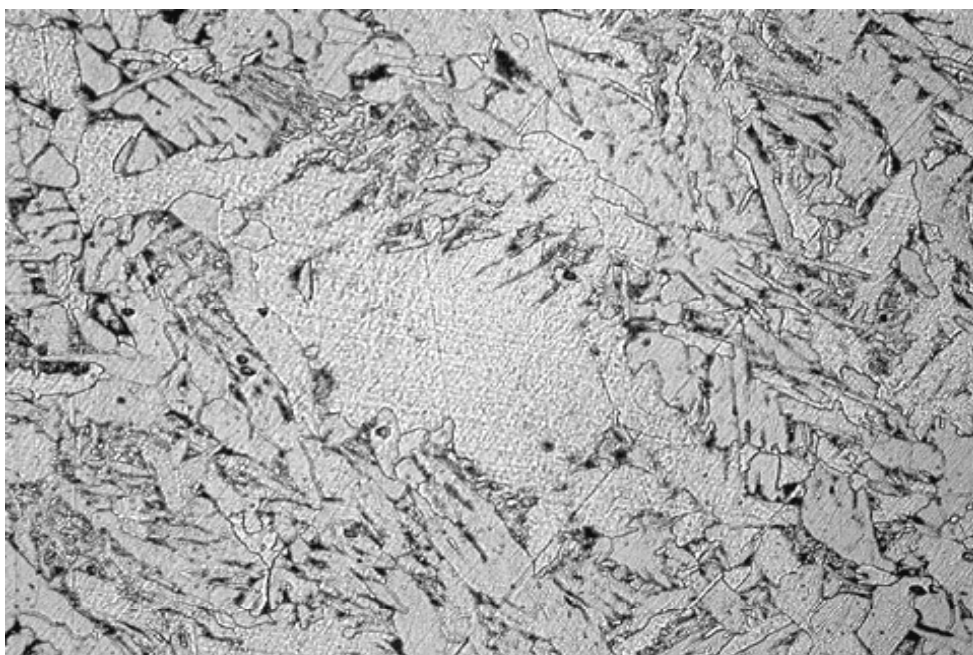
Zhrublé feritické zrno, místy jemnější přesycené feritické zrno. Vyskytují se zrnka perlitu.



NITAL

Obr.78: Přechodová vrstva do svaru D

200x



NITAL

Obr.79: Svarová oblast E

200x

Licí dendritická struktura s výraznými jehlicemi feritu.

Gradient tvrdosti vzorku 4

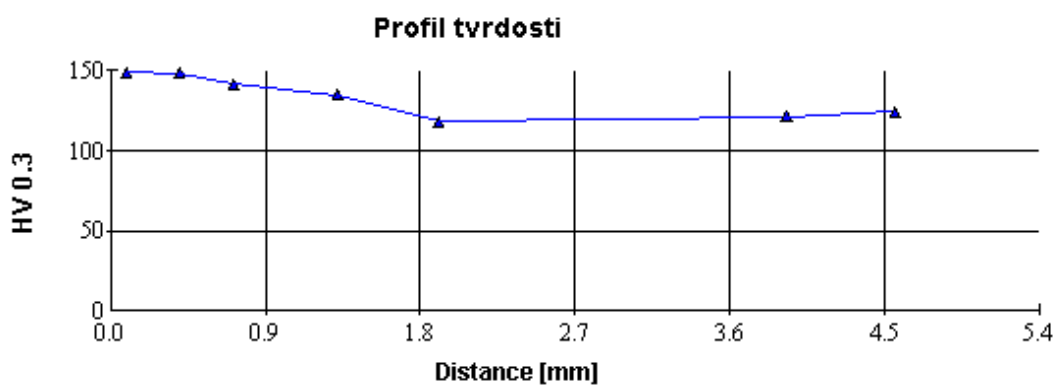
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

Vzorek 10 - gradient do základního materiálu A (EN 10027.1 S235JRG2)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	93.7	148.9	61.4	60.8	61.1
2	400.8	148.5	60.6	61.8	61.2
3	716.2	141.4	63.0	62.4	62.7
4	1320.0	134.7	63.3	65.3	64.3
5	1908.8	118.1	68.9	68.3	68.6
6	3929.3	121.3	67.5	67.9	67.7
7	4560.6	124.3	65.9	67.9	66.9

Minimum: 118.1
Průměr: 133.9
StDev: 12.880

Maximum: 148.9
Medián: 134.7



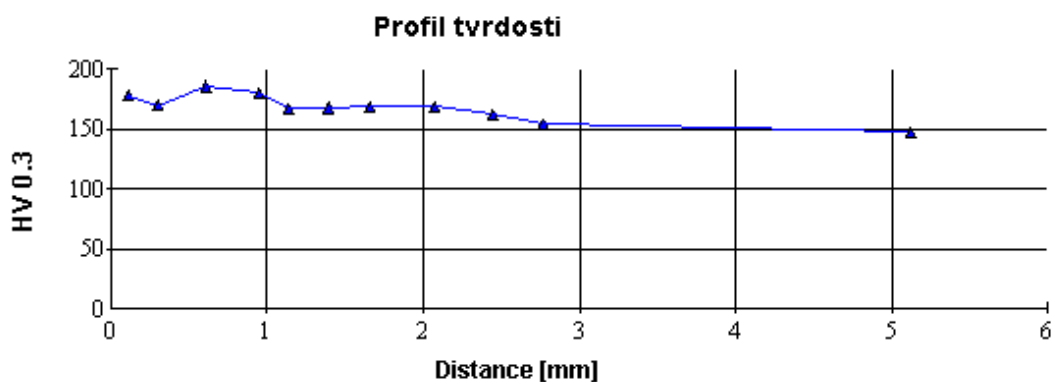
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

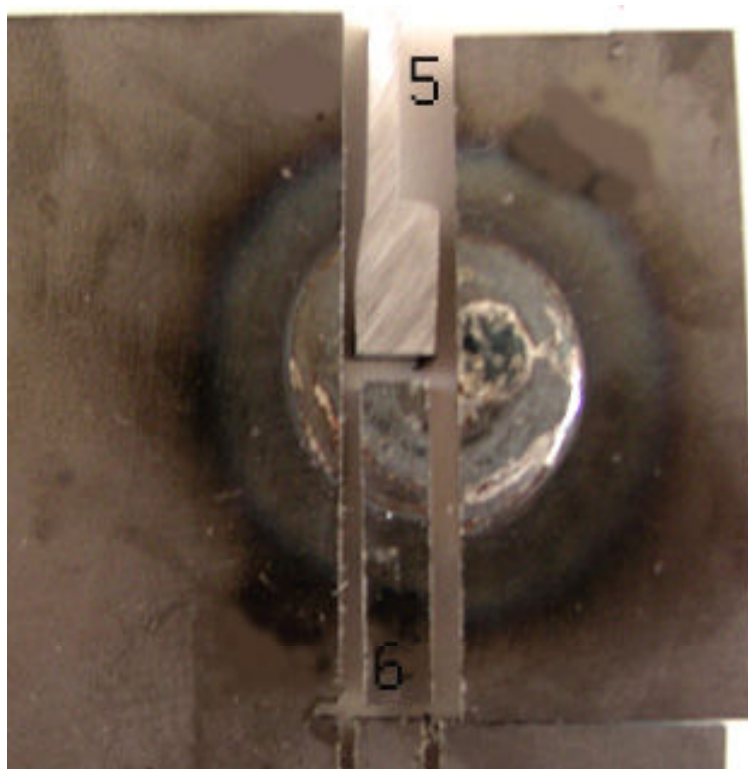
Vzorek 4 - gradient do základního materiálu B (EN 10027.1 S235JRG2)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	110.9	178.0	56.1	55.7	55.9
2	303.0	169.6	56.0	58.5	57.3
3	611.9	185.9	54.1	55.3	54.7
4	946.9	180.6	55.1	55.9	55.5
5	1138.0	167.5	56.9	58.3	57.6
6	1393.5	168.0	56.7	58.4	57.6
7	1659.3	169.4	57.3	57.3	57.3
8	2071.2	169.2	57.5	57.2	57.3
9	2446.0	162.2	56.9	60.2	58.6
10	2766.9	154.0	59.2	61.0	60.1
11	5118.2	147.5	60.6	62.2	61.4

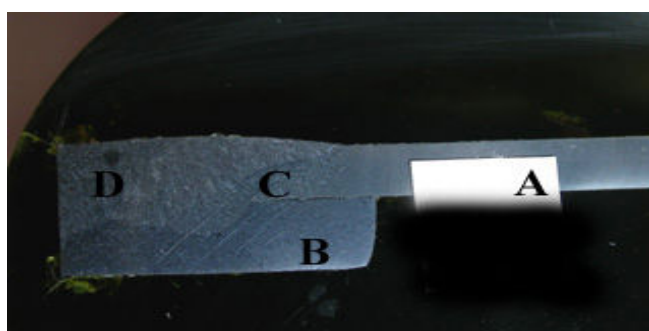
Minimum: 147.5
Průměr: 168.4
StDev: 11.110

Maximum: 185.9
Medián: 169.2

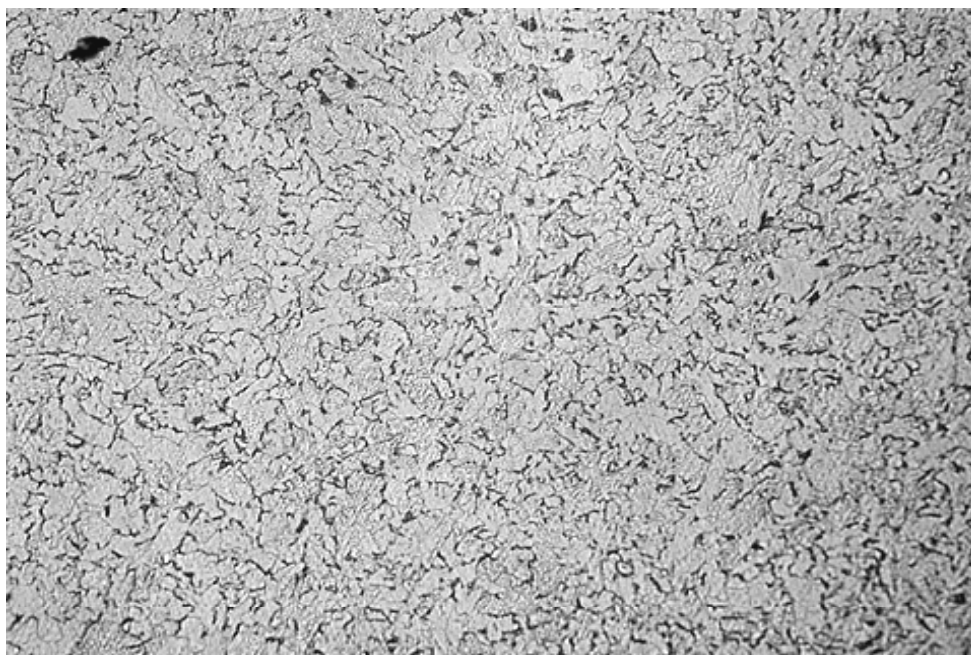




Obr.80: Základní vzorek
Vzorek 5,6 byl svařen metodou MAG, přídavný materiál EN G3Si1 \varnothing 1,2



Obr.81: Detail základního vzorku 5 (EN 10027.1 S235JRG2)

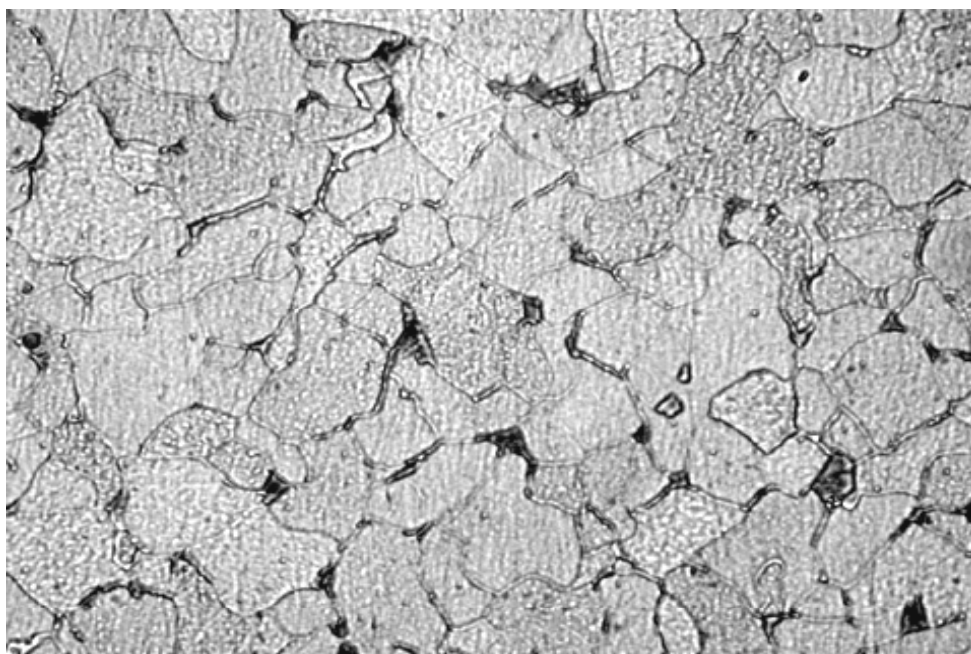


NITAL

Obr.82: Základní materiál A

200x

Jemná feritická struktura s vyloučenými řetízky cementitických globulí na hranicích zrn.

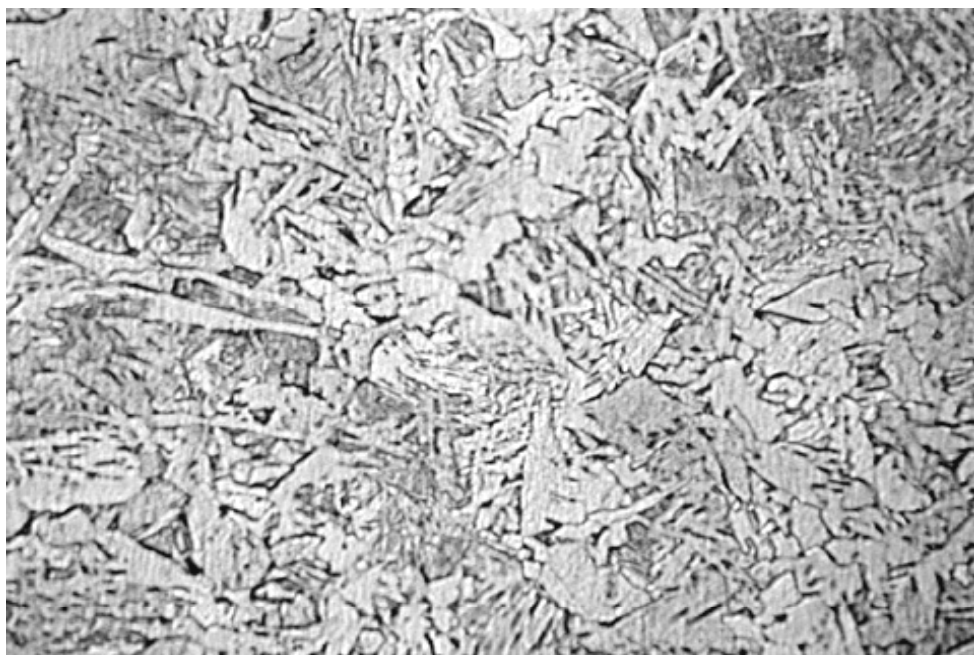


NITAL

Obr.83: Základní materiál B

500x

Poměrně jemnozrnná struktura s drobnými zrny perlitu s místními stopami terciálního cementitu po hranicích zrn.

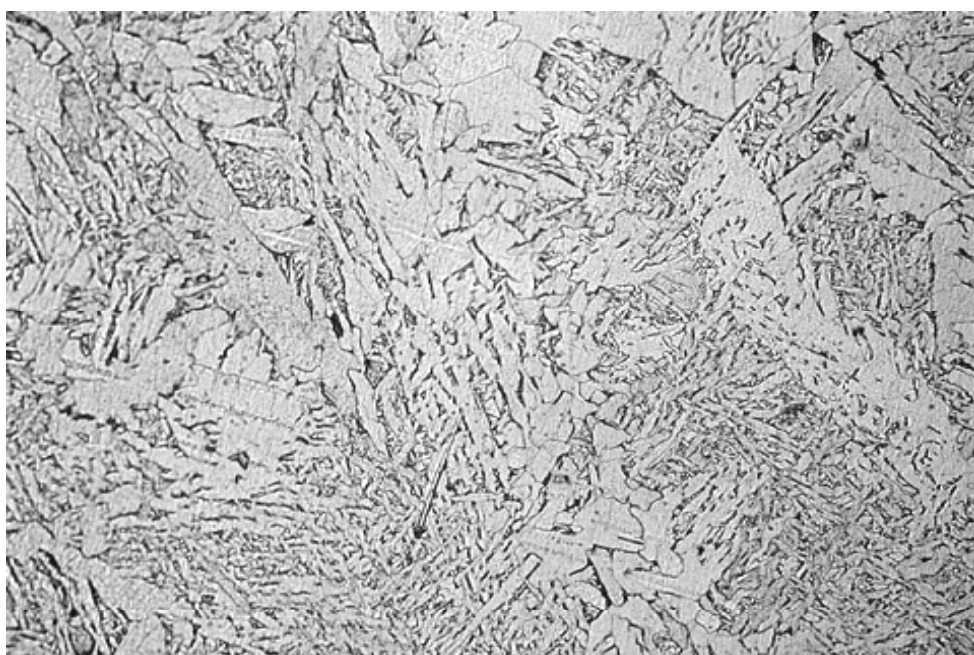


NITAL

Obr.84: Přechodová vrstva do svaru C

200x

Feritické jemnější jehlice, náznak licí struktury.

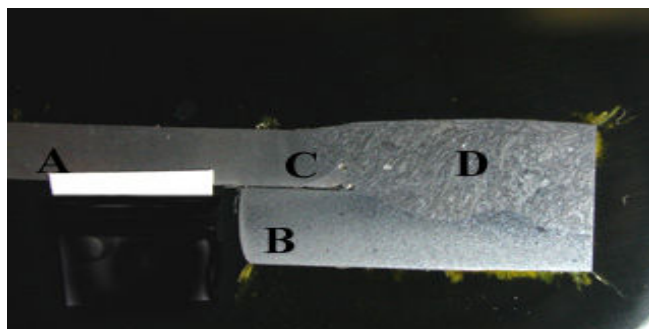


NITAL

Obr.85: Svarová oblast D

200x

Licí dendritická, jehlicovitá struktura svarového kovu.



Obr.86: Detail základního vzorku 6 (EN 10027.1 S235JRG2)



NITAL

Obr.87: Základní materiál A

200x

Jemnozrnná feritická struktura, místy feritická zrna s náznakem přesycení v podobě intenzivnějšího naleptání. Drobnější zrna perlitu.

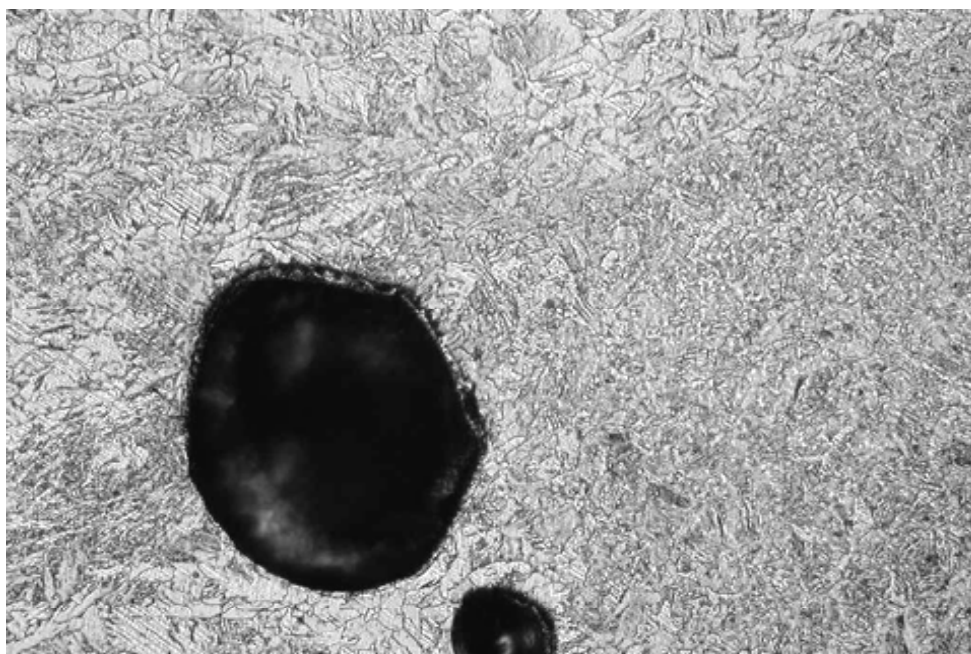


NITAL

Obr.88:Základní materiál B

200x

Celkem jemnozrnná feritická struktura, místy feritická zrna s náznakem přesycení v podobě intenzivnějšího naleptání.Drobnější zrna perlitu.

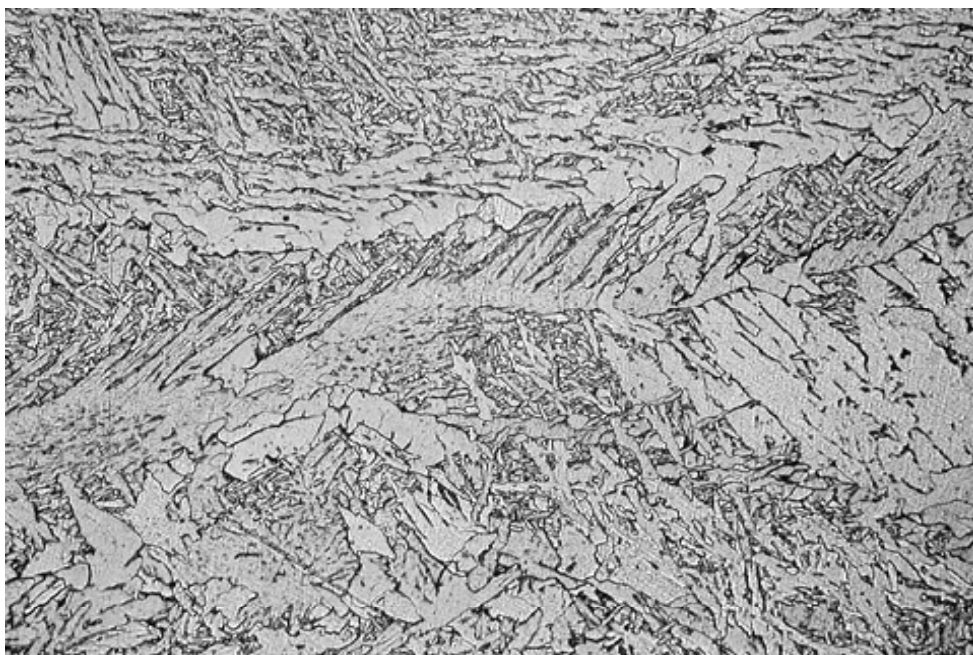


NITAL

Obr.89: Přechodová vrstva do svaru C

100x

Zjemnění zrna s následným hrubnutím a přechodem v jehlicovitý charakter. V přechodu svaru se objevují lunkry.



NITAL

Obr.90:Svarová oblast D

200x

Licí dendritická struktura s výraznými feritickými jehlicemi.

Gradient tvrdosti vzorku 6

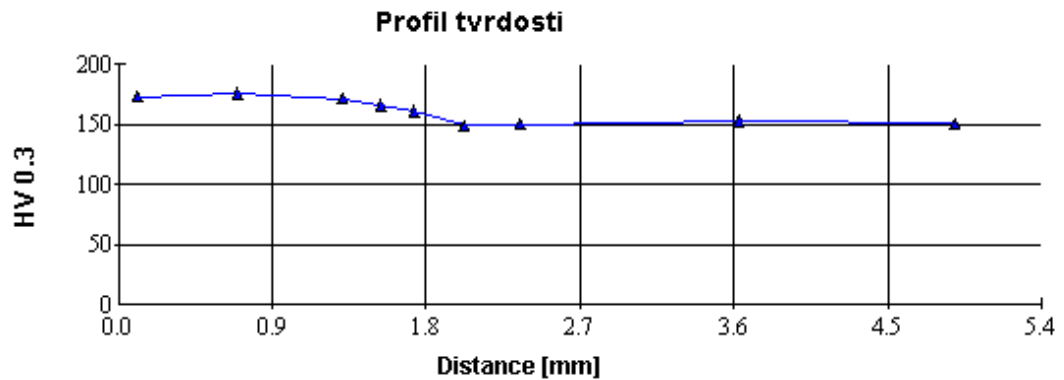
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

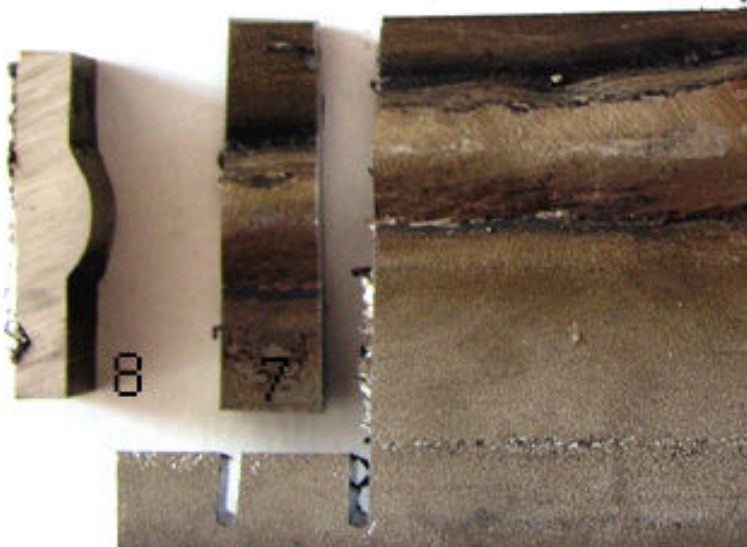
Vzorek 6 - gradient do základního materiálu (EN 10027.1 S235JRG2)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	107.9	173.6	56.1	57.1	56.6
2	696.1	176.0	55.3	57.2	56.2
3	1311.9	171.7	57.7	56.1	56.9
4	1534.9	166.3	57.5	58.2	57.8
5	1730.3	161.3	58.6	58.8	58.7
6	2022.7	149.6	60.2	61.8	61.0
7	2349.4	150.5	60.8	60.8	60.8
8	3632.2	153.2	59.6	61.0	60.3
9	4891.7	151.1	60.2	61.2	60.7

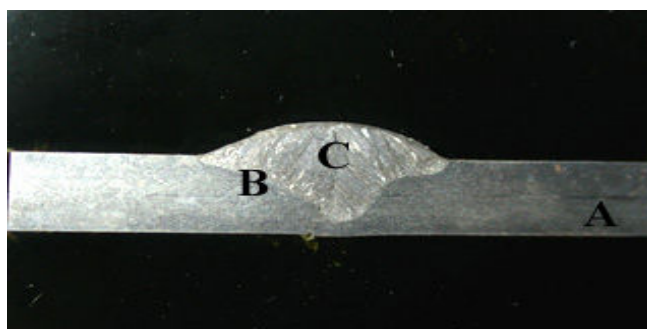
Minimum: 149.6
Průměr: 161.5
StDev: 10.755

Maximum: 176.0
Medián: 161.3

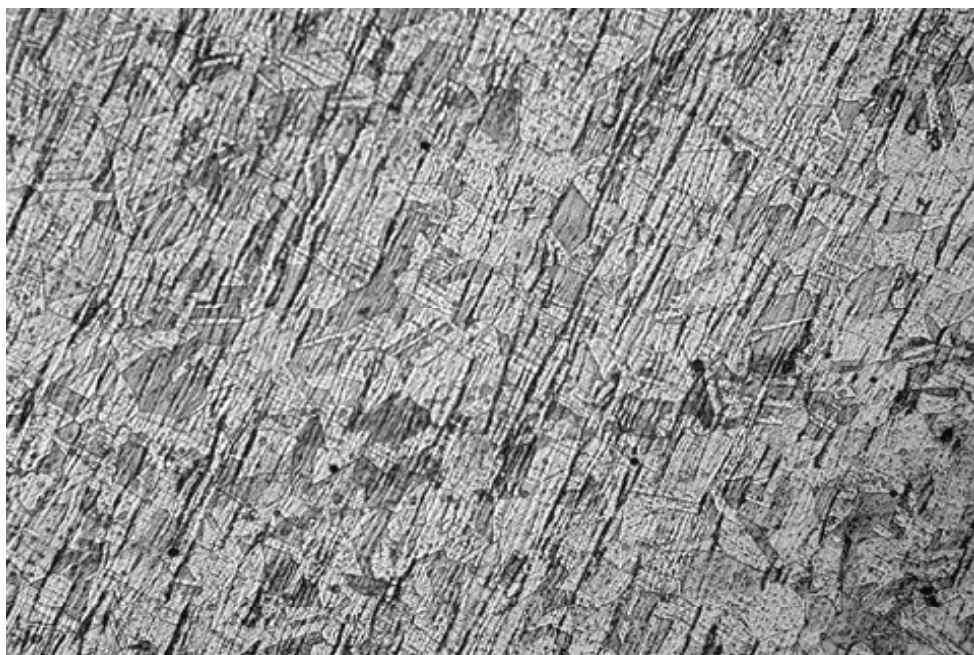




Obr.91: Základní vzorek
Vzorek 7,8 byl svařen obalenou elektrodou EN 1600 – E199LR32 \varnothing 1,2



Obr.92: Detail základního vzorku 7 (EN 10027.1 X6CrNi18 8)

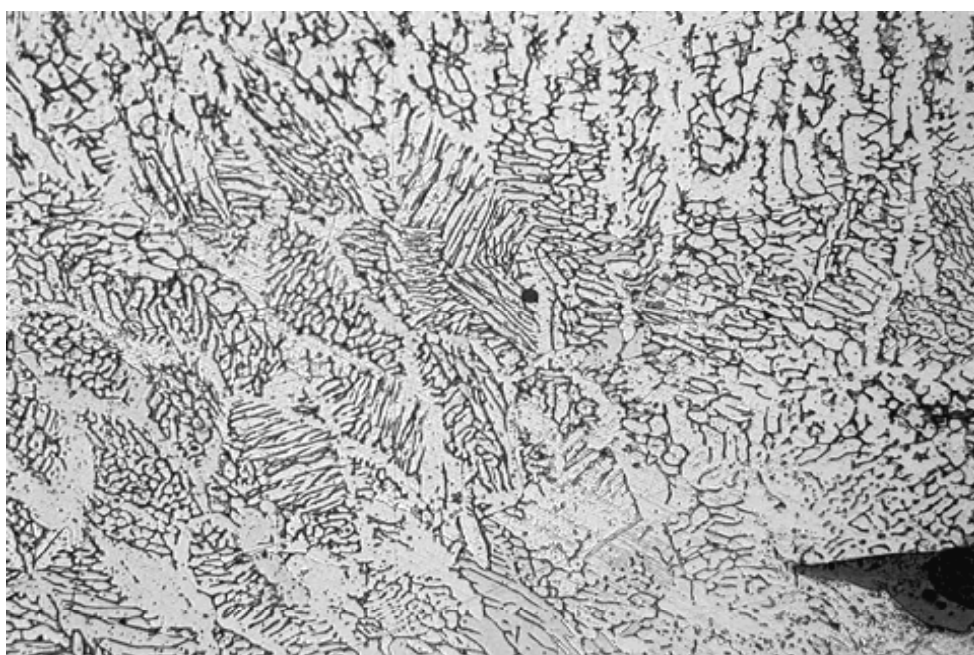


PORTEVIN

Obr.93: Základní materiál A

200x

Austenitická struktura s řádky karbidů, místy náznak dvojčatění austenitických zrn.

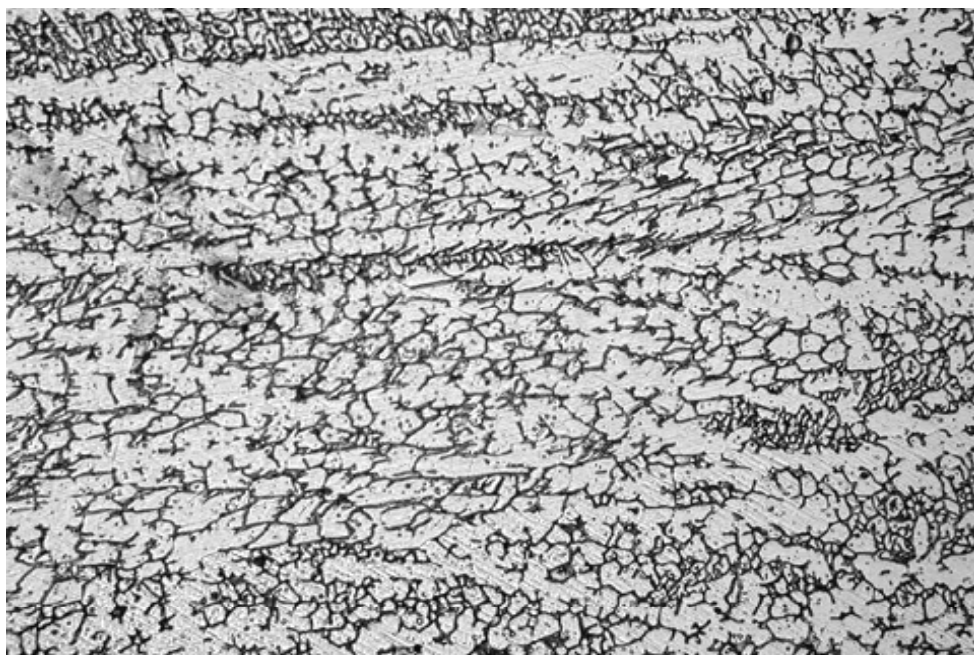


PORTEVIN

Obr.94: Přejímová vrstva do svaru B

200x

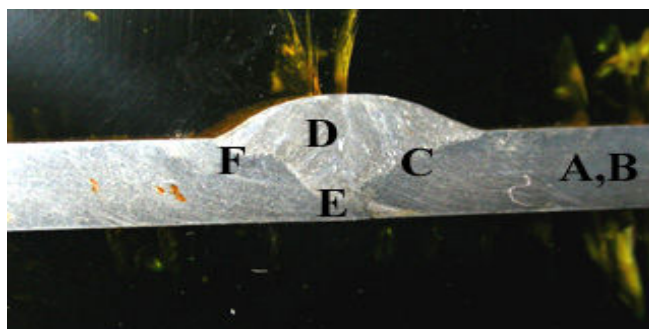
Náznak jehlicovité struktury, vrub ze strusky.



PORTEVIN

Obr.95: Svarová oblast C

200x



Obr.96: Detail základního vzorku 8 (EN 10027.1 X6CrNi18 8)

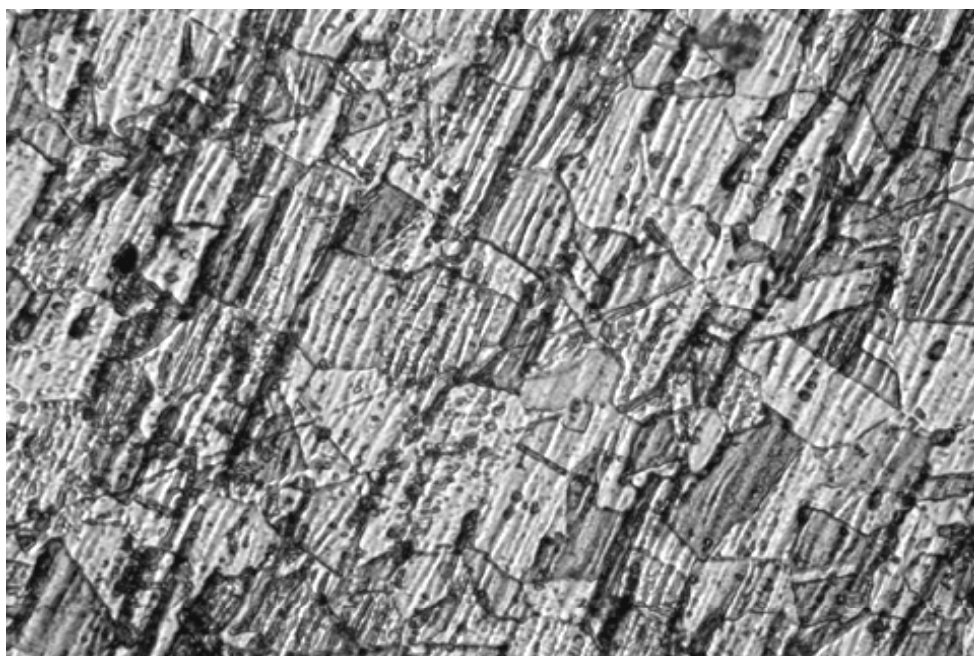


PORTEVIN

Obr.97: Základní materiál A

200x

Austenitická rovnoosá struktura s náznakem dvojčatění. V závislosti na orientaci zrn jsou některá jemně některá více naleptaná. Řádky protáhlých karbidických útvarů.



PORTEVIN

Obr.98: Základní materiál B

500x

Detail dvojčatění.

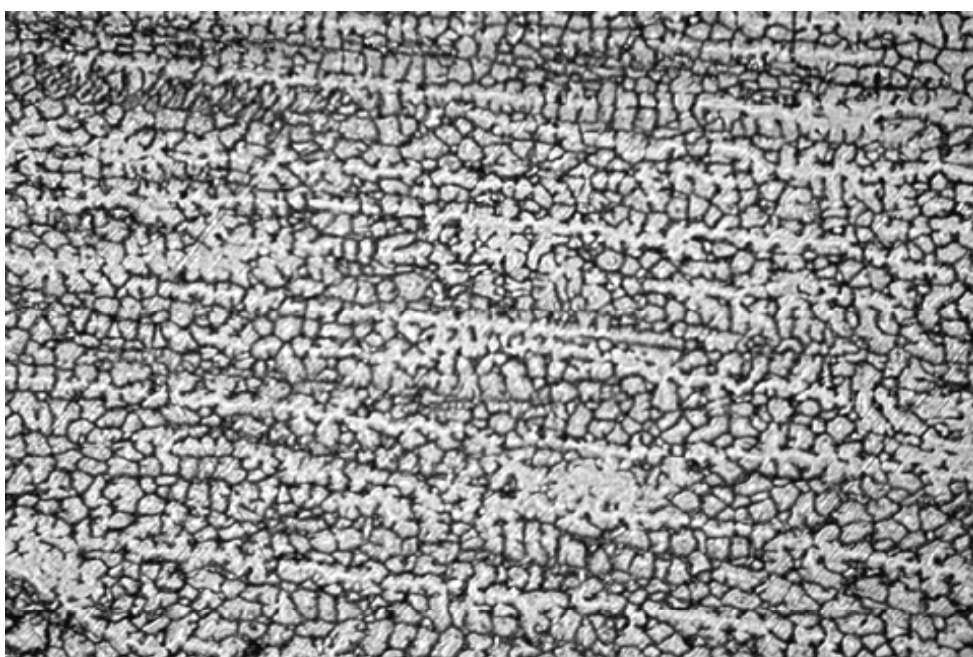


PORTEVIN

Obr.99: Přechodová vrstva do svaru C

200x

Náznak jehlicovité struktury.



PORTEVIN

Obr.100: Svarová oblast D

200x

Výrazně dendritická struktura se sítí karbidů.

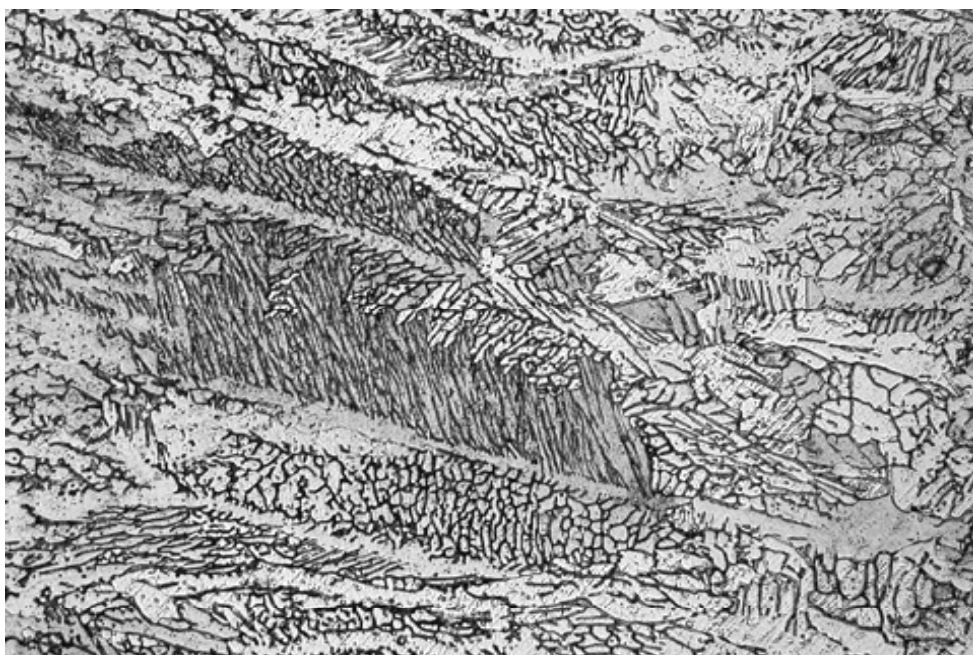


PORTEVIN

Obr.101: Přechodová vrstva do svaru E

100x

Vrub tvořený neprovařeným kořenem svaru, vyplněný z části okujemi.



PORTEVIN

Obr.102: Přechodová vrstva do svaru F

200x

Jehlicovitá, spíše stromčkovitá struktura.

Gradient tvrdosti vzorku 8

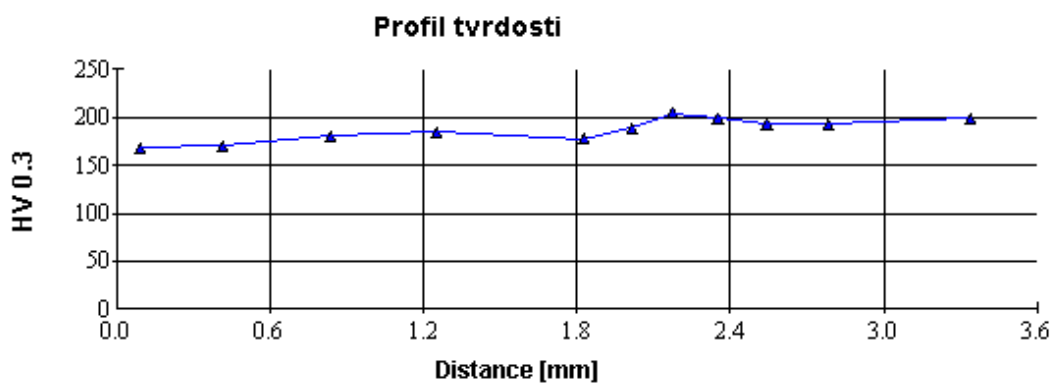
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

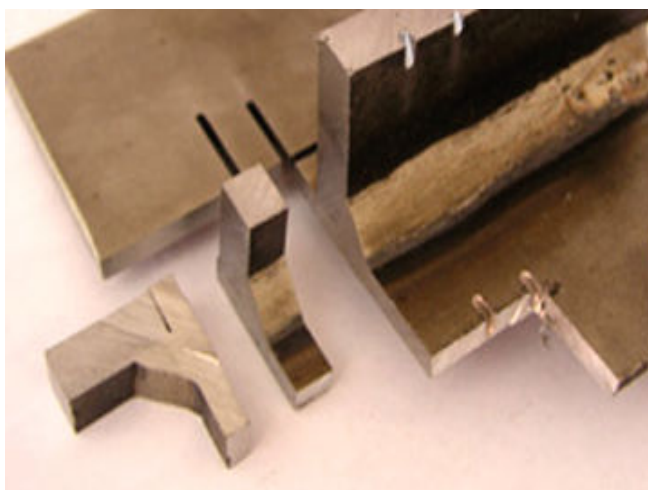
Vzorek 8: gradient do základního materiálu (EN 10027.1 X6CrNi18 8)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	91.0	168.4	56.4	58.5	57.5
2	414.4	170.3	58.7	55.6	57.2
3	837.3	180.2	57.6	53.5	55.6
4	1251.2	184.7	54.2	55.5	54.9
5	1825.3	177.3	55.1	56.9	56.0
6	2016.0	188.8	53.1	55.5	54.3
7	2173.7	204.3	53.3	51.1	52.2
8	2350.0	198.7	53.5	52.3	52.9
9	2542.1	193.1	54.1	53.3	53.7
10	2783.1	192.6	53.1	54.4	53.7
11	3337.2	199.3	51.6	54.1	52.8

Minimum: 168.4
Průměr: 187.1
StDev: 11.964

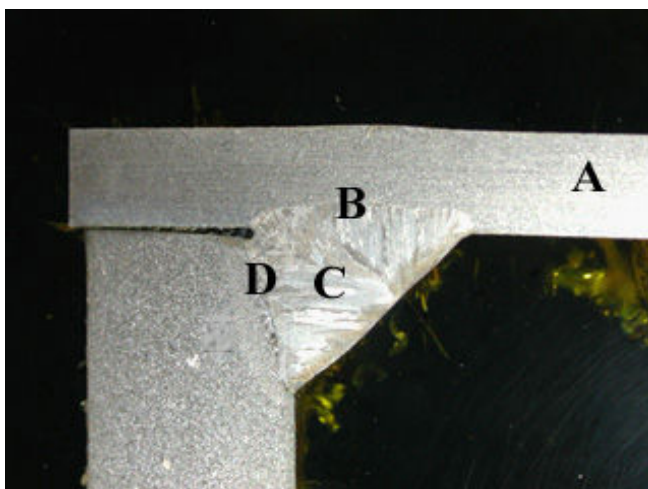
Maximum: 204.3
Medián: 188.8



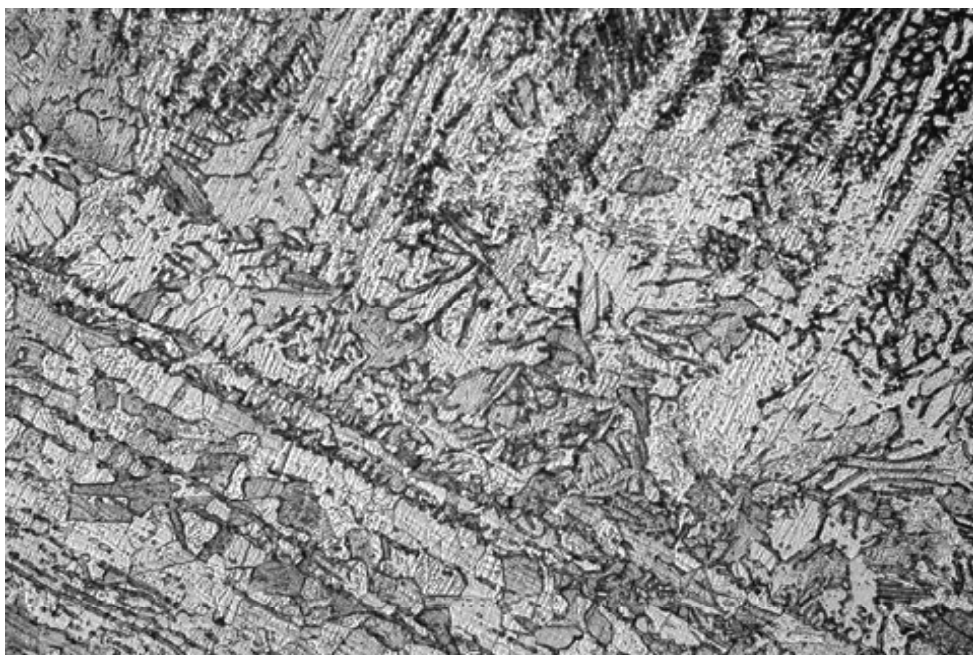


Obr.103: Základní vzorek

Vzorek 9,10 byl svařen elektrickým obloukem plněnou elektrodou v ochraně aktivního plynu. Přídavný materiál EN 12073 – T2312LRM3 Ø1,2



Obr.104: Detail základního vzorku 9 (A - EN 10027.1 X6CrNi18 8 a EN 10027.1 S235JRG2)



PORTEVIN

Obr.105: Základní materiál A

200x

Austenitická struktura s řádky karbidů, místy náznak dvojčatění austenitických zrn.

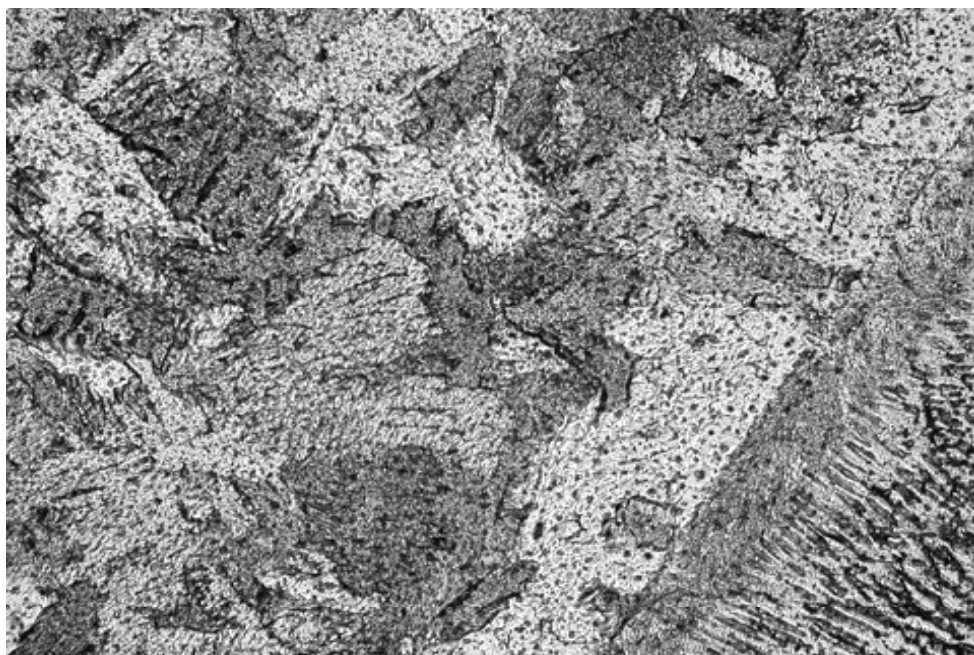


PORTEVIN

Obr.106: Přejímová vrstva do svaru B

200x

Hrubší struktura a kratšími dendrity, dendrity vyrůstají kolmo k základnímu materiálu.

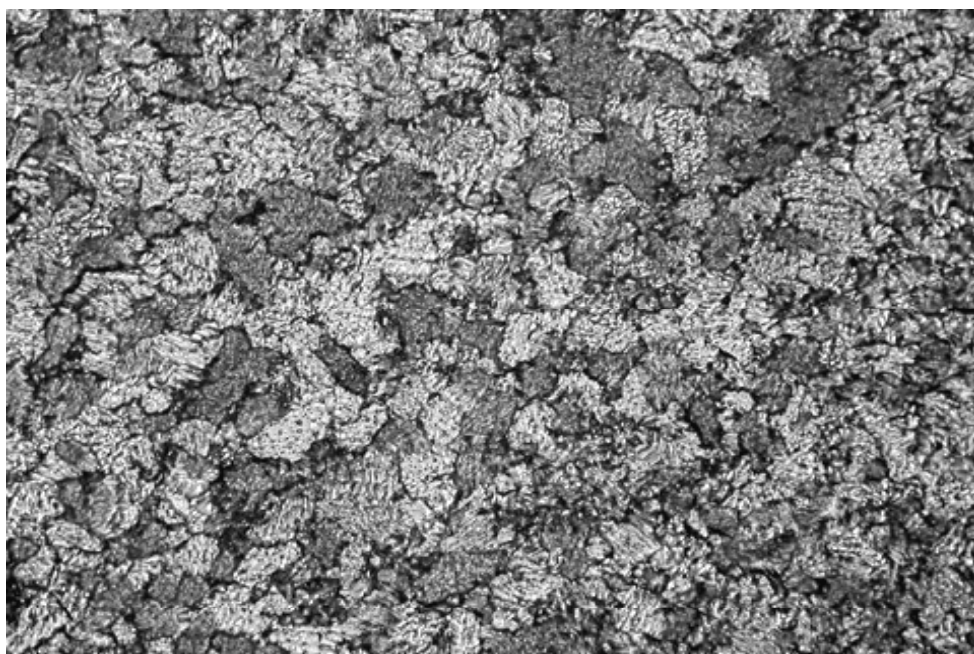


PORTEVIN

Obr.107: Svarová oblast C

200x

Přechodová vrstvička tvořena jehlicemi bainitického charakteru. Tloušťka přechodového pásma se mění. Ostrý přechod. Není výrazně difuzní pásmo..

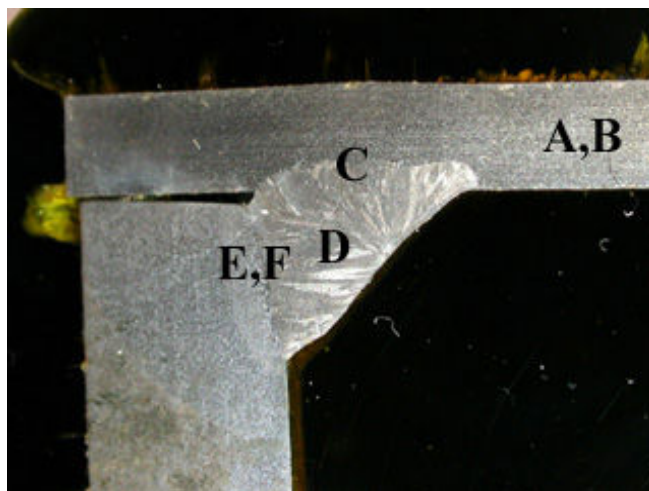


PORTEVIN

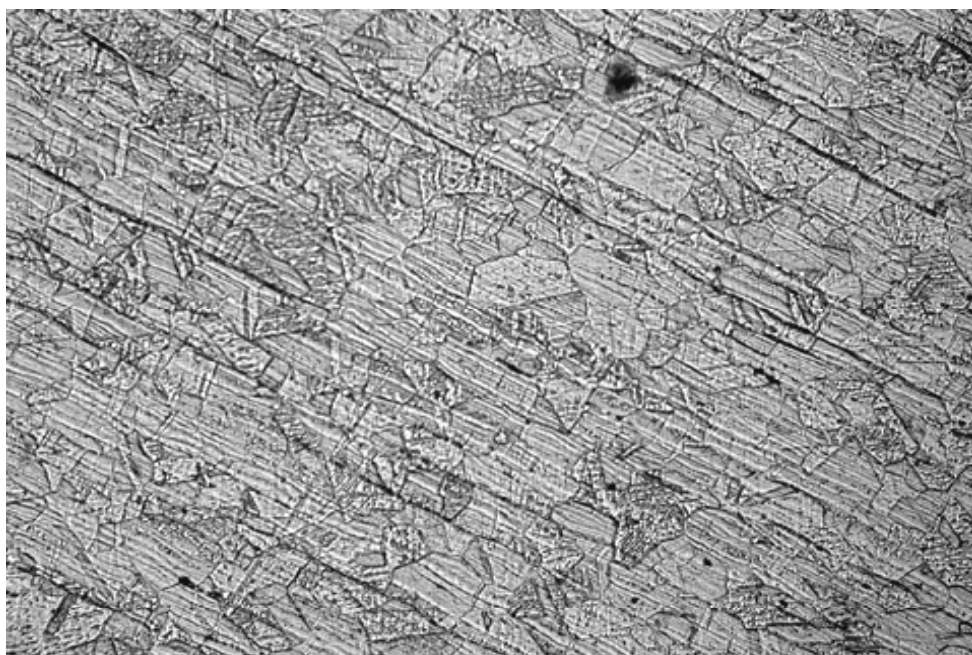
Obr.108: Přechodová vrstva do svaru D

200x

Přechod v základním materiálu je hrubozrnná feriticko-perlitická oblast. Perlit nevýrazně lamelární. Na tuto oblast navazuje podstatně jemnější oblast, která přechází do neovlivněné části základního materiálu se střední velikostí zrna.



Obr.109: Detail základního vzorku 10 (**A,B** - EN 10027.1 X6CrNi18 8 a EN 10027.1 S235JRG2)

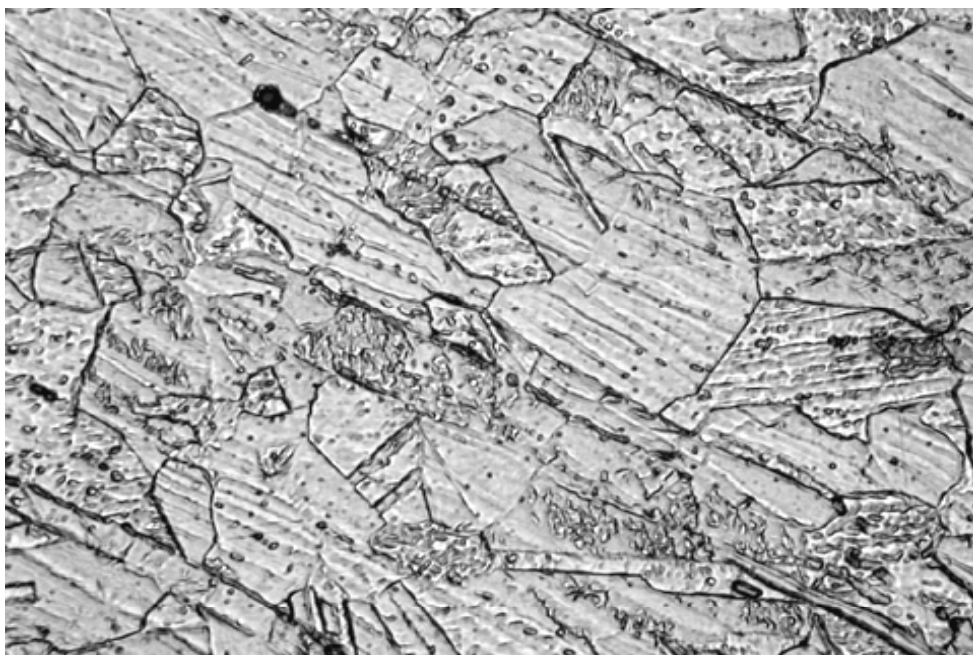


PORTEVIN

Obr.110: Přejímová vrstva do svaru A

200x

Austenitická struktura s řádkovitostí a s výrazným dvojčatěním.

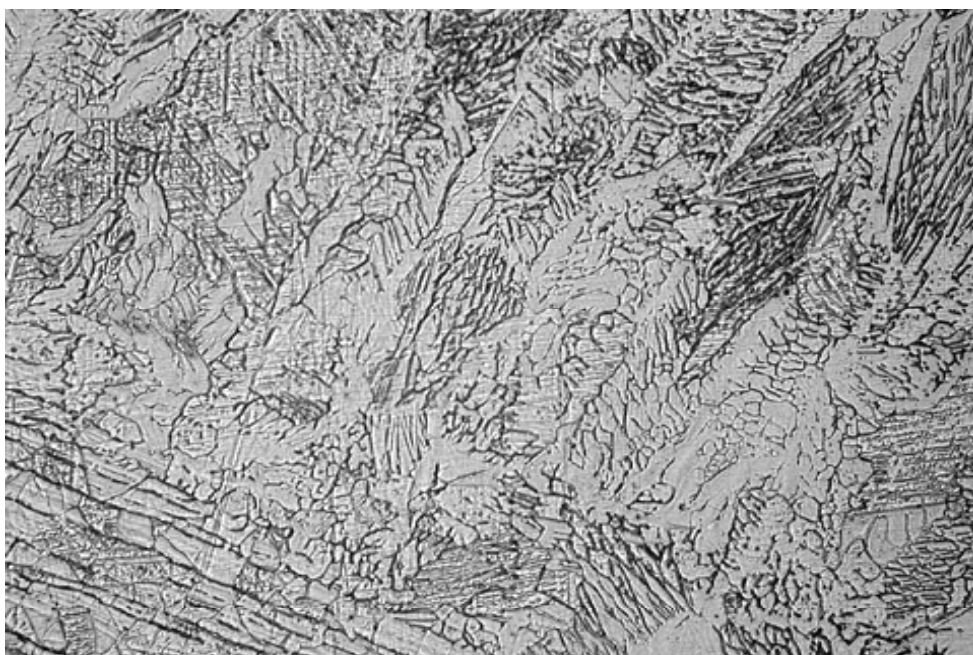


PORTEVIN

Obr.111: Základní materiál B

500x

Detail austenitické struktury s řádkovitostí a s výrazným dvojčatěním.



PORTEVIN

Obr.112: Přejímová vrstva do svaru C

200x

Hrubší dendrity se stromčkovitými útvary. Dále do svaru dendrity orientované kolmo k základnímu materiálu.



PORTEVIN

Obr.113: Svarová oblast D

200x

Dlouhé a jemnější dendrity tvořeny zrníčky austenitu a místy hustou karbidickou sítí.

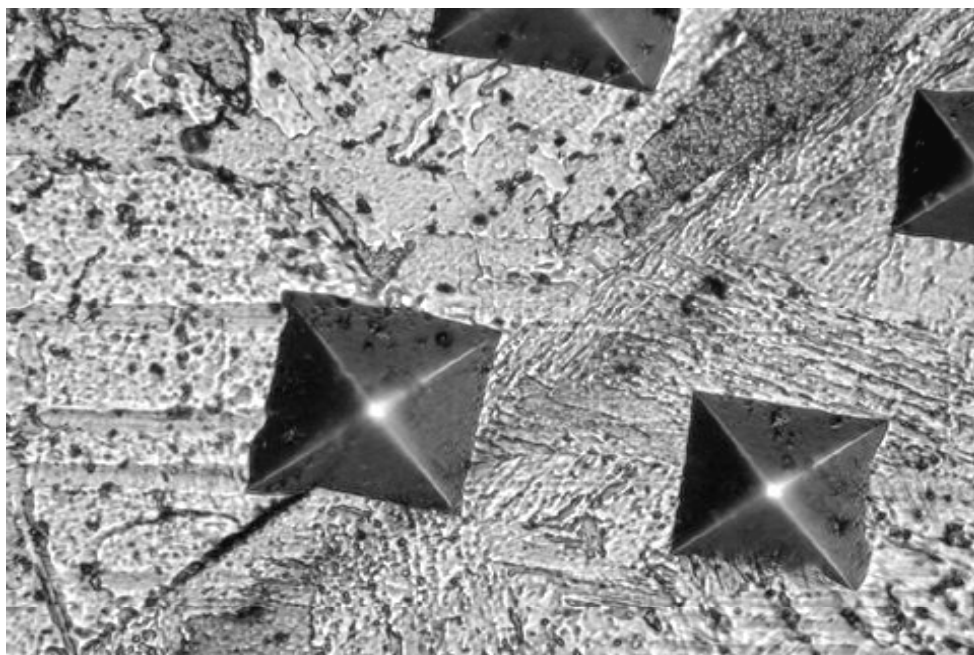


PORTEVIN

Obr.114: Přechodová vrstva do svaru E

200x

Přechod tvořen jemnou jehlicovitou strukturou bainitického charakteru, která směrem do svaru přechází v podobě kolmých dendritů. Směrem k základnímu materiálu hrubá feriticko bainitická zrna. Opět dělící čára mezi bainitickou a ovlivněnou strukturou základního materiálu, bez difuzního charakteru.



PORTEVIN

Obr.115: Přechodová vrstva do svaru F

500x

Detail dělicí čáry, mezi přechodovou oblastí a základním materiálem. Nespojitost ve svaru, znázorněná vtiskem do této dělicí roviny. Z metalografického hlediska spojení úplně difuzní. Místy je přechodová oblast nespojitá.

Gradient tvrdosti vzorku 10

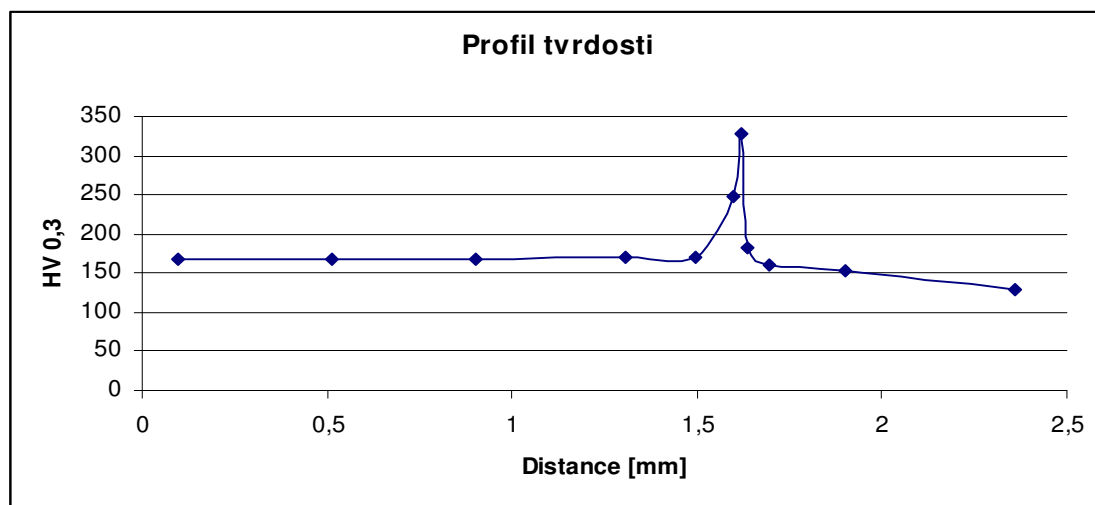
Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

Vzorek 10 - gradient do základního materiálu (EN 10027.1 S235JRG2)

#	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	99.2	166.8	57.3	58.2	57.7
2	512.0	168.8	56.9	57.9	57.4
3	899.4	167.5	56.3	58.9	57.6
4	1307.6	171.1	56.1	57.9	57.0
5	1497.4	171.0	56.3	57.7	57.0
6	1596.7	248.9	46.6	48.0	47.3
7	1621.8	329.3	41.1	41.1	41.1
8	1633.8	183.1	54.9	55.3	55.1
9	1696.4	161.3	57.2	60.3	58.7
10	1898.2	152.1	59.3	61.6	60.5
11	2357.6	129.1	63.2	68.0	65.6

Minimum: 129.1
Průměr: 186.3
StDev: 55.636

Maximum: 329.3
Medián: 168.8

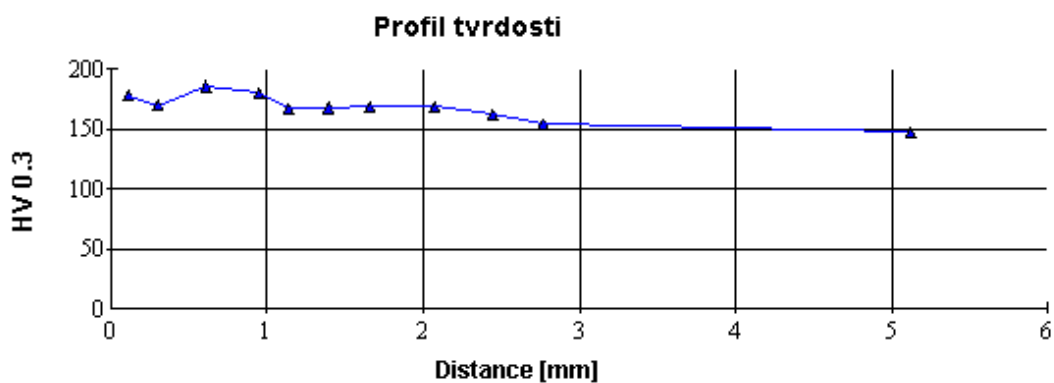


Metoda: Vickers
Objektiv: 40x
Zatížení: HV 0.3
Doba zatížení:

Vzorek 10 : gradient do základního materiálu (EN 10027.1 X6CrNi18 8)

	Dist[μm]	HV 0.3	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	110.9	178.0	56.1	55.7	55.9
2	303.0	169.6	56.0	58.5	57.3
3	611.9	185.9	54.1	55.3	54.7
4	946.9	180.6	55.1	55.9	55.5
5	1138.0	167.5	56.9	58.3	57.6
6	1393.5	168.0	56.7	58.4	57.6
7	1659.3	169.4	57.3	57.3	57.3
8	2071.2	169.2	57.5	57.2	57.3
9	2446.0	162.2	56.9	60.2	58.6
10	2766.9	154.0	59.2	61.0	60.1
11	5118.2	147.5	60.6	62.2	61.4

Minimum: 147.5 **Maximum:** 185.9
Průměr: 168.4 **Medián:** 169.2
StDev: 11.110



3.4 Nedestruktivní zkouška metodou kapilární

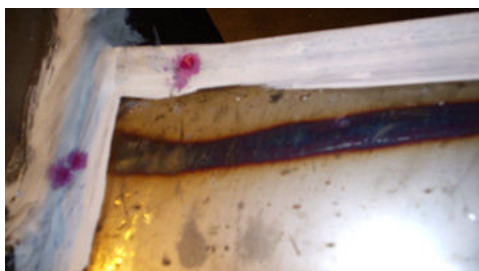
Při tomto experimentu, který se používá ve firmě O.K.STAVEBNÍ jsem zkoumal vady svarů na několika vzorcích viz. dodané fotografie. S vadami jsem se setkal jen ve výjimečných případech. Tyto vady byly po zjištění označeny a po očištění povrchu od detekční barvy byly opraveny vybroušením vadného místa svaru a převařeny novou vrstvou svaru.



Obr.116: Nanesení detekční tekutiny na svar



Obr.117: Nanesení vývojky na zkoušený svar



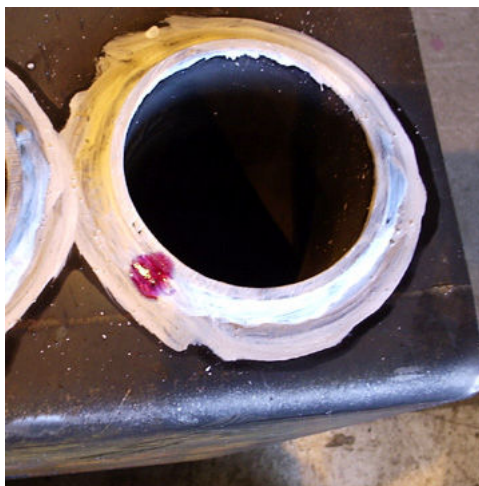
Obr.118: Indikace detekční kapaliny na zkoušeném svaru



Obr.119: Indikace detekční kapaliny na zkoušeném svaru



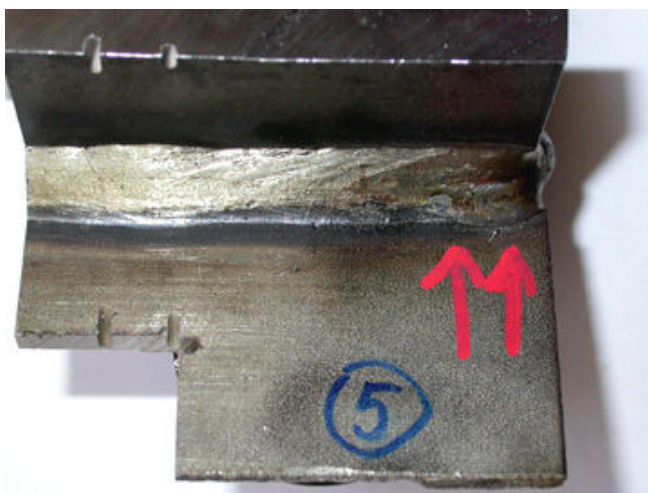
Obr.120: Nanesení vývojky na zkoušený svar



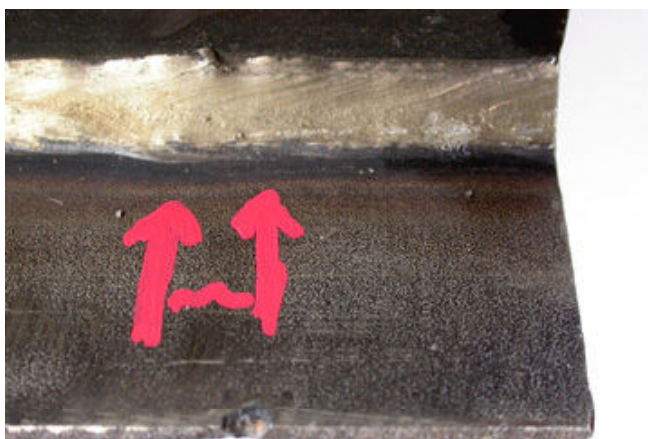
Obr.121: Indikace detekční kapaliny na zkoušeném svaru

3.5 Zkoušení svarů ultrazvukem

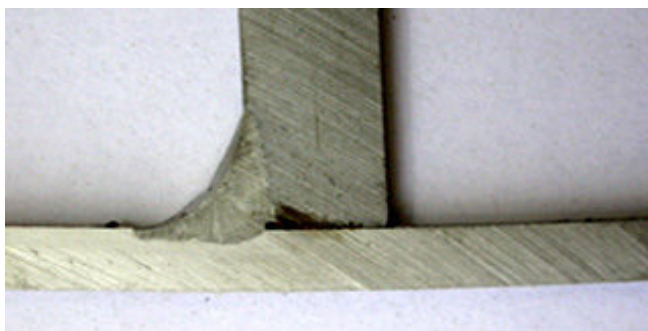
Při tomto experimentu jsem použil pouze ty typy svarů, u kterých byla tato zkouška proveditelná viz.dodané fotografie. Použil jsem ultrazvukový přístroj od firmy STARMANS DIO-562 a dvojitou sondu typu PQ10-4C 02.038. S vadami ve svarech jsem se setkal pouze výjimečně a tato místa jsem dále posuzoval. Po rozřezání označených míst jsem nenašel žádné vady ve svarech,tudíž můžu konstatovat,že signál vydával neprovařený kořen svaru,který hodnotím jako vrub.



Obr.122: Označení vady zjištěné ultrazvukem



Obr.123: Označení vady zjištěné ultrazvukem



Obr.124: Oblast svaru po rozříznutí označeného místa

4 Diskuse výsledků

Ve vzorku 6, kde se svařuje materiál EN 10027.1 jakosti S235JRG2 metodou MAG s přídatným materiálem EN 44G3Si1 \varnothing 1,2 se objevily tzv. lunkry, což může být zapříčiněno nadměrným tepelným příkonem při svařování. Pro odstranění této vady doporučuji snížit tepelný příkon při svařování těchto částí.

U vzorku 7,8, kde je svařován materiál EN 10027.1 jakosti X6CrNi188 obalenou elektrodou podle EN 1600 – E199LR32 jsem se setkal s technologickou vadou v podobě tzv. „neprůvaru kořene svaru“. Toto mohlo být zapříčiněno nedodržením technologických podmínek, což může být např. nevhodné zvolení parametrů při svařování, nebo zde může současně působit lidský faktor v podobě nedodržení správného sklonu elektrody při svařování, případně nedodržení správné rychlosti svařování atd.

U vzorků 9 a 10 dochází ke svařování dvou různých materiálů, a to materiálu EN 10027.1 jakosti S235JRG2 s materiálem EN10027.1 jakosti X6CrNi188, což vyžaduje použití speciální svařovací technologie. Zde je používána technologie svařování elektrickým obloukem plněnou elektrodou v ochraně aktivního plynu za použití přídatného materiálu EN 12073 – T2312LRM3 \varnothing 1,2. Nedokonalá difuze přechodové oblasti svaru se jeví na mikrosnímku jako vada „studený spoj“, který mohl vzniknout v důsledku nedostatečného přívodu tepla v konkrétním místě (obr.115), což mohlo být zapříčiněno výkyvem elektrody, nesprávným sklonem elektrody nebo i špatným nastavením parametrů při svařování. Dále bych upozornil, že takto zvolená konstrukce svaru (vzorek 9,10) může zapříčinit, že se kořen svaru bude chovat jako vrub.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se svařovacími technologiemi, používanými při výrobě kotlů ústředního topení ve firmě O.K. STAVEBNÍ s.r.o., analyzovat problematické polotovary a na dodaných vzorcích provést metalografii svaru, přechodové oblasti a základního materiálu, gradient tvrdosti v oblasti svaru a jeho okolí, případně provést doplňujících zkoušek.

Svařovací technologie používané ve firmě O.K. STAVEBNÍ jsou svařování elektrickým obloukem, svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou, svařování impulsním obloukem (Puls – MIG) a svařování elektrickým obloukem plněnou elektrodou v ochranné atmosféře aktivních plynů. Jedna z vad se vyskytla u základního vzorku č. 10, kdy nedošlo k dokonalé difuzi a objevila se prasklinka obr. 114 a 115. Dále se dá hodnotit technologie svarů u vzorků č. 7,8,9,10 jako nevyhovující, kdy dochází k neprovaření kořene svaru a ten se může chovat jako vrub.

U výroby polotovarů jsem se zaměřil na řezání polotovarů plazmou, kde v současné době dochází k největším problémům v nepřesnostech. Zde se jako nejlepší řešení jeví zakoupení nové technologie řezání a to buď nového kvalitnějšího agregátu plazmy, ale i celého suportu nebo v lepším případě technologie laserového řezání.

V metalografii svaru jeho okolí a základního materiálu nebyly zjištěny žádné výrazné vady. Pouze u vzorku č. 10 se vyskytla utčítá anomálie, v podobě bainitického pásma, což dokumentuje i prudké místní zvýšení tvrdosti na doloženém tvrdostním gradientu.

Jako doplňující zkoušky jsem zvolil zkoušky nedestruktivní a to zkoušky kapilární a zkoušení svaru ultrazvukem. U zkoušek kapilárních jsem na vady svaru narazil jen zřídka a ty byly v zápětí opraveny. U zkoušení svarů ultrazvukem vzorky č. 9,10 vykazovaly vady, ale po prozkoumání místa rozřezáním vzorku jsem zjistil, že tyto vady vykazoval již zmíněný vrub (obr. 104,109 a 124).

Seznam použité literatury

- [1] Kuncipál,J. a kol.: Teorie svařování, SNTL Praha, 1986
- [2] Kuncipál,J. a kol.: Svařování pro konstruktéry a technology, SNTL Praha, 1980
- [3] Séférian,D: Nauka o kovech ve svařování ocelí, SNTL Praha, 1962
- [4] Macek,K., Zuna,P. a kol.: Nauka o materiálu, ČVUT 2002
- [5] Janovec,J., Macek,K., Zuna,P.: Fyzikální metalurgie, ČVUT Praha, 2004
- [6] Firemní literatura

Poděkování

Závěrem této bakalářské práce bych rád poděkoval Ing. Václavovi Kubíčkovi za vedení při vypracování bakalářské práce, Vlastě Čílové za pomoc při realizování praktických částí experimentu, vedení a zaměstnancům O.K.STAVEBNÍ s.r.o. za pomoc, cenné rady a připomínky k řešeným problémům.

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Jsem si vědom toho, že bakalářská práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám bez svolení školy disponovat. Bakalářská práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu bakalářskou práci vyžádat v Univerzitní knihovně v Liberci, kde je archivována.

Jméno a příjmení : Zdeněk Bašta

Adresa : Seifertova 825
54931 Hronov

V Liberci, červen 2006